



ENTWICKLUNG UND INBETRIEBNAHME EINES MATERIALTESTFELDES IM SOLAREN STRAHLENSCHUTZBEREICH DER FORSCHUNGSEBENE AM SOLARTURM JÜLICH

Fachbereich Energietechnik
der Fachhochschule Aachen

Bachelorthesis

zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Engineering

vorgelegt von

Patrick Bernhard Thelen

geboren am 16.08.1988 in Aachen

im November 2016

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. M. Hellmanns
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. (FH) Stefan Schmitz

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Abschlussarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst zu haben. Sowohl inhaltlich als auch wörtlich entnommene Inhalte wurden als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in dieser oder vergleichbarer Form noch keinem anderem Prüfungsgremium vorgelegen.

Datum: _____ Unterschrift: _____

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit nutzen, um mich bei einigen Personen zu bedanken, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ich danke Herrn Prof. Dr. Hellmanns für die Betreuung dieser Arbeit.

Zudem möchte ich mich beim Institut für Solarforschung des DLR in Jülich für die Bereitstellung und Ermöglichung dieser Arbeit bedanken. Ich habe mich von Anfang an integriert und als Teil eines großen Projektes gefühlt.

Mein besonderer Dank gilt hierbei Stefan Schmitz für die sehr gute und lehrreiche Betreuung am Arbeitsplatz und dem Vertrauen, das er mir entgegengebracht hat.

Des Weiteren danke ich auch Felix Göhring für die konstruktiven fachlichen Anmerkungen, welche zu einer kontinuierlichen Verbesserung dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein großer Dank gebührt auch Björn Freitag und Volkmar Dohmen, welche vor allem bei den mechanischen Arbeiten eine große Unterstützung waren. Außerdem danke ich auch Gereon Feckler und Marcel Sibum, welche mir bei der Verlegung der Sensorleitungen und der Implementierung der Sensorik in LabView eine große Hilfe waren.

Ebenso danke ich Carina Müller-Ilkay und Patrick Arregui für Ihre sprachlichen und grammatikalischen Korrekturen.

Abseits der fachlichen Seite, möchte ich mich auch noch bei meiner Lebensabschnittsgefährtin, meinen Eltern und meiner Schwester bedanken, ohne deren besonderen Rückhalt mein Studium nicht so reibungslos vonstatten gegangen wäre. Zudem wussten Sie mich immer zu motivieren.

Vielen Dank!

Alsdorf 25.11.16

Patrick Bernhard Thelen

„Es ist nicht wenig Zeit, die wir haben, sondern es ist viel Zeit, die wir nicht nutzen.“
Seneca

„Man kann das Leben nur rückwärts verstehen, aber man muss es vorwärts leben.“
Sören Kierkegaard

Kurzfassung

Innerhalb dieser Arbeit wurde ein Materialtestfeld im solaren Strahlenschutzbereich der Forschungsebene am Solarturm Jülich entwickelt und in Betrieb genommen. Dabei wurde ein Strahlenschutzelement so bearbeitet, dass sechs Proben zeitgleich untersucht werden können. Die gewählte Probengröße bietet zusätzlich die Möglichkeit, das SunCatch STJ anstelle einer Probe zu verbauen und zu verwenden. Die auftretenden Einflüsse der Strahlungs- und Witterungsbedingungen können über ein Radiometer, vierzehn Thermoelemente, zwei Dehnungsmessstreifen, einer im Heliostatfeld befindlichen Kamera und einer naheliegenden Wetterstation erfasst werden. Um die Daten aller Sensoren an einem Ort erfassen zu können, wurde ein zentraler Schaltschrank aufgebaut und mit Messkarten bestückt. Des Weiteren wurden alle für die Auswertung des SunCatch STJ relevanten Messkarten in den Schaltschrank implementiert. Im Betrieb senden die Messkarten die ermittelten Messgrößen seriell über einen RS485-Bus an den PC. Die erste Visualisierung und Speicherung erfolgt über eine in dieser Arbeit programmierte LabView-Software. Da die Erfassung der Strahlungsflussdichte nur über das installierte Radiometer geschieht, wurden zwei Arten der Interpolation über ein Grauwertbild miteinander verglichen. Zum Einen wurden dabei weiß lackierte Aluminiumreflexionskörper neben den Proben und zum Anderen das umliegende weiße Coating betrachtet. Das Ergebnis daraus ist, dass beide Interpolationen fast den gleichen Korrekturfaktor für die Strahlungsflussdichte liefern. Aus diesem Grund, kann im weiteren Betrieb auf die Verwendung des Reflexionskörpers verzichtet werden. Die Inbetriebnahme erfolgte über zwei Messreihen, welche Aussagen zur Eignung von Materialien und zur Validierung der Messgrößen zulassen. Bei der Eignungsprüfung wurden weiße und schwarze Aluminiumfasern den Strahlungsbelastungen direkt ausgesetzt und es zeigte sich, dass die Farbe der schwarzen Fasern nach der Bestrahlung mit einer Endtemperatur von etwa 600 °C fast vollständig abgeplatzt war. Aufgrund der Tatsache, dass die Materialien im Strahlenschutzbereich des Solarturms Temperaturen bis etwa 1000 °C ausgesetzt sind, eignen sich die schwarzen Aluminiumfasern nicht für den Einsatz. Zur Validierung der Temperaturmessungen wurden die spezifischen Wärmeleitfähigkeiten von Aluminiumsilikatwolle, Erdalkalisilikatwolle und MACOR berechnet und mit den Angaben der Hersteller verglichen. Dabei zeigte sich, dass die berechneten Wärmeleitfähigkeiten in den richtigen Größenordnungen liegen und untereinander vergleichbare Werte liefern. Daraus ist zu schlussfolgern, dass die Temperaturerfassung des Materialtestfeldes für weitere Versuche verwendet werden kann. Um auch die Messwerterfassung mittels Dehnungsmessstreifen validieren zu können, wurde ein solcher auf die Rückseite der MACOR-Probe geklebt. Resultierend aus den erfassten Messwerten wurde der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient bestimmt und mit den Angaben aus dem Datenblatt des Herstellers verglichen. Auch hier lag das berechnete Ergebnis in der richtigen Größenordnung, was die Richtigkeit der mit Hilfe der Dehnungsmessstreifen erfassten Messwerte bestätigt. Abschließend ist zu sagen, dass das Materialtestfeld plausible Ergebnisse liefert und für weitere Realitätsversuche verwendet werden kann. Eine Materialcharakterisierung im Labor kann dadurch jedoch nicht ersetzt werden.

Abstract

In this thesis the development and operation of a test set up in the solar radiation protection of the research level at the solar tower Jülich is described. One element of the radiation protection was modified in a way so that six material samples can be analyzed at the same time. Furthermore, the selected sample size allows to install and use the SunCatch STJ, a flux measurement device, instead of a sample. The concentrated solar radiation and environmental influences were recorded by a radiometer, fourteen thermocouples, two strain gauges, a camera located in the heliostat area, and a nearby weather station. A central control cabinet was set up and equipped with signal modules for digital and analogue input collecting the signals of the different sensors. In addition, all signal modules relevant for the analysis of the SunCatch STJ were implemented in the central control cabinet, too. During operation of the test-set-up, the signal modules send all recorded data to a computer via a RS485-Bus. The visualization and storage of the recorded data was realized by a Lab-view VI which was programmed for this thesis. As the radiant flux density was exclusively measured by the radiometer, two types of interpolation were compared using a grey-value image. On the one hand white coated reflection samples were and on the other hand the not absolutely uniform white coating surrounding the material samples was evaluated. As a result of this comparison, both interpolations provided nearly the same adjustment factor for the radiant flux density. Therefore, the use of the reflection samples was redundant for the subsequent operation. The commissioning was conducted in two test series which allowed to draw conclusions about the suitability of the materials and the validity of the measurements. During the suitability test, black and white aluminum fibers were exposed directly to the radiation. It was found that the color of the black fibers nearly completely peeled off after reaching a final temperature of 600 degrees Celsius. As the materials used in the area of radiation protection in the solar tower are exposed to temperatures up to 1000 degrees Celsius, the black fibers are not suitable for the solar tower. To validate the temperature measurement, the specific thermal conductivities of aluminum silicate, alkaline earth silicate wool and MACOR were calculated and compared to the manufacturer specifications. The result was that the calculated thermal conductivities are in the right order of magnitude and can offer comparable values among each other. It can be concluded that the temperature measurement of the test-set-up can be used for further experiments. In order to also validate the measurement of the strain gauges one of these was glued to the back of the MACOR sample. With the measured values the coefficient of linear thermal expansion was calculated and also compared to the manufacturer specifications. Once more the calculated result was in the right order of magnitude, confirming the accuracy of the signals gathered with the help of the strain gauges. As a conclusion it can be stated that the test set-up delivers plausible results and thus can be used for further experiments. Nonetheless, it can not replace a material characterization conducted in a laboratory.

I Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	2
Kurzfassung	5
Abstract	6
I Inhaltsverzeichnis	7
1 Einleitung	9
1.1 Erneuerbare Energien	9
1.2 Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt	9
1.3 Solarthermisches Versuchskraftwerk Jülich	9
1.4 Die Forschungsebene	10
1.4.1 Ziel dieser Arbeit	11
2 Theoretische Grundlagen	12
2.1 Wärmeübertragungsarten	12
2.1.1 Konduktion	12
2.1.2 Konvektion	12
2.1.3 Radiation	12
2.2 Thermische Ausdehnung	13
2.3 Wärmestrom und Wärmestromdichte	13
2.4 Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit	13
2.5 Reflexion	14
2.5.1 Direkte Reflexion	14
2.5.2 Diffuse Reflexion	15
2.6 Blendung	15
2.7 Messsensorik	16
2.7.1 Thermoelemente	16
2.7.2 Radiometer	17
2.7.3 SunCatch STJ	18
2.7.4 Der temperaturabhängige Widerstand	19
2.7.5 Der Dehnungsmessstreifen	19
2.7.6 Die Messbrücke	21
2.7.7 Kamera im Heliostatfeld	22
3 Konzeptionierung des Materialtestfeldes	23
3.1 Positionierung des Materialtestfeldes	23
3.2 Das Messkonzept	24
3.3 Die auftreffende Strahlungsflussdichte	25
3.4 Die Probenauswahl	25
3.4.1 Die verwendeten Wärmedämmstoffe	25
3.4.2 MACOR	26
3.4.3 Aluminiumfasern	26
3.5 Der Probenhalter	27
3.6 Bearbeitung des Strahlenschutzelementes	28

3.7	Das Messsystem	29
4	Realisierung des Konzepts	30
4.1	Aufbau des Messsystems	30
4.1.1	Installation des Materialtestfeldes	31
4.2	Aufbau des Schaltschranks	32
4.2.1	Die verwendeten Messkarten	33
4.3	Visualisierung der Messgrößen	33
5	Inbetriebnahme und erste Tests	36
5.1	Probenbelegung und Verteilung der Sensorik	36
5.2	Validierung der ermittelten Temperaturen über die Bestimmung von Wärmeleitkoeffizienten	37
5.2.1	Auswertung der Strahlungsflussdichte	38
5.2.2	Die Absorbtionskoeffizienten	46
5.2.3	Abstände der Thermoelemente	46
5.2.4	Die erfassten Temperaturverläufe	47
5.2.5	Stagnation der Temperaturverläufe	48
5.2.6	Berechnung des Wärmeleitkoeffizienten	51
5.2.7	Fehlerabschätzung der experimentell bestimmten Wärmeleitkoeffizienten	51
5.3	Optische Untersuchung von Materialien	53
5.3.1	Untersuchung von schwarzen und weißen Aluminiumfasern	53
5.4	Bestimmung des linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten	56
5.4.1	Die Erfassung der Widerstandsänderung	56
5.4.2	Darstellung der erfassten Widerstandsänderungen	57
5.4.3	Berechnung des linearen Ausdehnungskoeffizienten	58
5.4.4	Fehlerrechnung zur Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten	58
6	Zusammenfassung und Ausblick	60
6.1	Zusammenfassung	60
6.2	Ausblick	60
7	Anhang	61
7.1	Datenblätter	63
II	Abbildungsverzeichnis	69
III	Tabellenverzeichnis	71
IV	Formelverzeichnis	72
V	Abkürzungsverzeichnis	73
VI	Literaturverzeichnis	75

1 Einleitung

1.1 Erneuerbare Energien

Eine der größten Bedrohungen des einundzwanzigsten Jahrhunderts ist der Klimawandel. Dieser kann nur verlangsamt oder aufgehalten werden, wenn ein Umdenken in dem Energieverbrauch und der Energiegewinnung stattfindet. Bei der Energiewende muss der steigende Energiebedarf durch eine intelligente, umweltfreundliche, regenerative und bezahlbare Energieversorgung ergänzt oder teilweise ersetzt werden [1, DLR2015,S.44]. Dieses globale Streben verbindet die Forschung mit der Industrie und lässt immer wieder neue Ideen zu umsetzbaren Projekten werden.

1.2 Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt ist unter anderem seit mehreren Jahrzehnten erfolgreich in der Energieforschung aktiv[1, DLR2015,S.44]. Die Forschungsgebiete in der Energietechnik erstrecken sich über weite Bereiche wie zum Beispiel von effizienten Gasturbinen über alternative Brennstoffe, Elektrolyse und Brennstoffzellen bis hin zu solarthermischen Kraftwerken und Energiespeichern [1, DLR2015,S.44].

1.3 Solarthermisches Versuchskraftwerk Jülich

An dem Standort Jülich betreibt das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt eines der wenigen Solarturmkraftwerke in Europa. Der prinzipielle Aufbau des Solarturms Jülich ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Das Spiegelfeld besteht aus etwa 2100 Heliostaten. Ein Heliostat ist ein mechanischer Aufbau mit einem Spiegel, welcher unabhängig von der Sonnenposition einen ortsfesten Reflexionspunkt der Sonne erzeugt. Mit Hilfe einer komplexen Regelung werden die auf die Heliostaten auftreffenden Sonnenstrahlen in einem Punkt am Receiver gebündelt. Ein Receiver ist der Strahlungsempfänger eines Solarkraftwerks, an der die konzentrierte Sonnenstrahlung der Heliostaten in Wärme umgewandelt wird [2, DLR2015,S.48]. Die gewonnene Wärme wird mit Hilfe eines Trägermediums, in Jülich mit Luft, zu einem Heizkessel geführt. Die angesaugte Luft erhitzt sich dabei auf bis zu 700 °C und erzeugt so im Heizkessel Wasserdampf, welcher eine Turbine antreibt. Der folgende Generator produziert auf Mittelspannungsebene Strom, welche in das öffentliche Netz eingespeist wird. Der große Vorteil des Solarturms gegenüber anderen erneuerbaren Energien, wie zum Beispiel der Photovoltaik, besteht darin, dass der Solarturm einen Wärmespeicher besitzt. Die erzeugte Wärme am Receiver kann direkt an die Turbine, aber auch in den Wärmespeicher befördert werden. Die gespeicherte Wärme wird zum weiteren Betrieb der Turbine in lichtarmen Stunden verwendet.

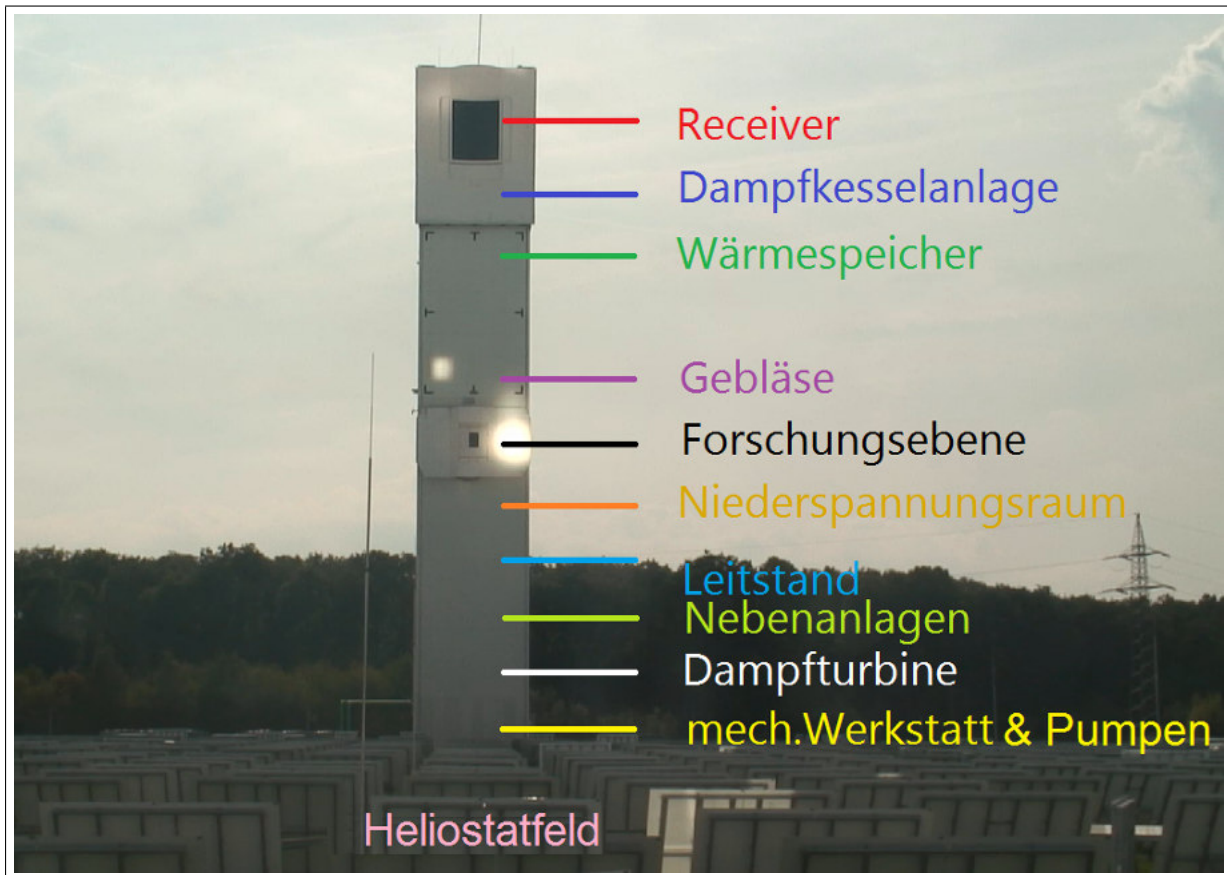


Abbildung 1.1: Prinzipieller Aufbau des Solarturms Jülich

1.4 Die Forschungsebene

Auf halber Höhe des Solarturms wurde eine Ebene für wechselnde Versuchsaufbauten installiert. Auf dieser Ebene befindet sich ein Laborraum, welcher die Umsetzung diverser Experimente mit konzentrierter Sonnenstrahlung zulässt. Hierbei wurden in der Vergangenheit unter anderem Versuche zur Weiterentwicklungen von Receivern oder auch Verfahren zur solarthermischen Herstellung von Wasserstoff durchgeführt. Um die Turmfassade und Messanlagen zu schützen wurde ein Strahlenschutz aufgebaut. Das Material des Strahlenschutzes unterliegt dabei starken Belastungen aufgrund der gebündelten Strahlung und den Witterungsbedingungen über längere Zeiträume. Aufgrund der vielen auf das Material einwirkenden Belastungen können im Labor nur durch einen hohen Arbeitsaufwand Aussagen über die Eignung von Materialien getroffen werden. Aufgrund dessen entstand die Idee, dass ein im Strahlenschutzbereich installiertes Materialtestfeld realitätsnahe Erkenntnisse über die Auswirkungen der Strahlungs- und Witterungsbelastungen auf die Materialien liefern kann.

1.4.1 Ziel dieser Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Inbetriebnahme eines Materialtestfeldes im solaren Strahlenschutzbereich der Forschungsebene am Solarturm Jülich. Dieses soll die realen Auswirkungen der Umwelteinflüsse, sowie der auftretenden konzentrierten Sonnenenergie auf eine Vielzahl von Proben messtechnisch erfassen und eine Auswertung ermöglichen. Durch die unterschiedlichen Belastungen der Proben sollen unter anderem geeignete Alternativen für den Strahlenschutzbereich am Solarturm Jülich gefunden werden. Zur Realisierung des Projektes wird ein einzelnes Strahlenschutzelement bearbeitet und mit passender Sensorik bestückt. Bei der Inbetriebnahme wird zum Einen eine Validierung der Messeinrichtung und zum Anderen ein erster Materialtest durchgeführt.

2 Theoretische Grundlagen

Innerhalb dieses Kapitels werden die für die Arbeit relevanten Grundkenntnisse aus den Bereichen der Messtechnik und Physik behandelt.

2.1 Wärmeübertragungsarten

Nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik findet der Wärmetransport immer nur vom wärmeren zum kühleren Energiereservoir statt. Diese thermische Energie kann auf drei Arten übertragen werden [3, Tip2015S.632]:

1. Konduktion oder auch Wärmeleitung
2. Konvektion oder auch Wärmeströmung
3. Radiation oder auch Wärmestrahlung

2.1.1 Konduktion

Bei der Konduktion vollzieht sich der Energietransport durch Wechselwirkungen zwischen Atomen oder Molekülen, die dabei aber selbst nicht transportiert werden [3, Tip2015S.632]. Wird beispielsweise ein fester Stab an einem Ende erwärmt, dann schwingen die Atome an diesem Ende mit höherer Energie als die Atome am kalten Ende, die eine geringere Energie haben [3, Tip2015S.632]. Durch Stöße mit den jeweils benachbarten Atomen wird die Wärmeenergie allmählich durch den Stab transportiert, sodass auch das kalte Ende erwärmt wird [3, Tip2015S.632]. Somit stellt sich langfristig ein thermodynamisches Gleichgewicht ein.

2.1.2 Konvektion

Bei der Konvektion ist die Wärmeübertragung mit einem Stofftransport verknüpft [3, Tip2015S.632]. Wird beispielsweise die Luft in einem Zimmer durch einen Heizkörper erwärmt, nimmt ihre Dichte ab und es wirkt eine Auftriebskraft auf sie ein, sodass sie aufsteigt und die aufgenommene Wärme nach oben mitnimmt [3, Tip2015S.632].

2.1.3 Radiation

Bei der Radiation wird Energie durch elektromagnetische Wellen, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, auch im evakuierten Raum transportiert [3, Tip2015S.632]. Die Strahlungsarten unterscheiden sich voneinander durch ihre Frequenz- bzw. ihre Wellenlängenbereiche [3, Tip2015S.632].

2.2 Thermische Ausdehnung

Aufgrund der Energiegewinnung durch aufgenommene Wärme, kommt es in der Regel zu einer Expansion des Körpers [3, Tip2015S.535]. Bei der Betrachtung fast eindimensionaler Gebilde, wo die Ausdehnung scheinbar nur in eine Richtung stattfindet, lässt sich über die direkte Proportionalität zwischen der Temperaturänderung ΔT und der Längenausdehnung Δl ein lineares Verhältnis bilden [3, Tip2015S.535].

$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha_s \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

Der Längenausdehnungskoeffizient α_s ist der Proportionalitätsfaktor zwischen der materialspezifischen Längenausdehnung und der Temperaturänderung [3, Tip2015S.535].

$$\alpha_s = \frac{\Delta l}{l \cdot \Delta T} \quad (2.2)$$

Der Volumenausdehnungskoeffizient β_s einer kubischen Probe, bei der die Längenausdehnung in alle räumliche Richtungen stattfindet, ist analog der Formel 2.2 [3, Tip2015S.535].

$$\beta_s = \lim_{\Delta T \rightarrow \infty} \frac{\Delta V/V}{\Delta T} = \frac{1}{V} \frac{\delta V}{\delta T} \quad (2.3)$$

2.3 Wärmestrom und Wärmestromdichte

Der Wärmestrom \dot{Q} ist ein Indikator für die Wärmeübertragung. Dieser gibt an, wie viel Wärme pro Zeiteinheit übertragen wird [4, Böc2011,S.5]. Bezieht man den Wärmestrom auf eine bestimmte Flächeneinheit A , so erhält man die Wärmestromdichte $\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A}$ [4, Böc2011,S.5].

2.4 Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit

Die Temperaturleitfähigkeit α_T ist eine Größe, welche die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Temperaturänderung in einem Körper angibt. Diese Größe kann unabhängig von Materialkonstanten, nur anhand eines Temperaturprofils ermittelt werden. Die Wärmeleitfähigkeit λ hingegen ist eine spezielle Stoffeigenschaft und gibt an, welcher Wärmestrom pro Längeneinheit des Materials in Richtung des Wärmestromes und pro Grad Temperaturdifferenz übertragen werden kann [4, Böc2011S.11]. Die Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit hängen wie in Formel 2.4 über die Dichte ρ und die spezifische Wärmekapazität c_p voneinander ab.

$$\lambda = \alpha_T \cdot \rho \cdot c_p \quad (2.4)$$

Ausgehend von der der Fourier'schen Differentialgleichung und der Tatsache, dass im Verlauf dieser Arbeit die stationäre Wärmeleitung in einer eindimensionalen Platte betrachtet wird, vereinfacht sich folgende Gleichung [5, Pol2009S.51]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{\omega} \quad (2.5)$$

und wird zu [5, Pol2009S.64]:

$$\dot{Q} = A \dot{q}_x = A \frac{\lambda}{s} (T_1 - T_2) \quad (2.6)$$

Aus Gleichung 2.6 folgt für den Wärmeleitkoeffizienten:

$$\lambda = \frac{\dot{Q}}{A} \cdot \frac{s}{(T_1 - T_2)} = \dot{F} \cdot \frac{s}{(T_1 - T_2)} \quad (2.7)$$

Hierbei kann eine grobe Materialunterscheidung in thermische Isolatoren und thermische Leiter getroffen werden. Isolatoren zeichnen sich durch einen geringen Wärmeleitungskoeffizienten aus. Zu diesen Materialien gehören unter anderem Dämmstoffe wie Glaswolle oder Aluminiumsilikat.

2.5 Reflexion

Das Wort Reflexion stammt aus dem Lateinischen und bedeutet Zurückbeugen. Das Zurückwerfen von Licht lässt sich schematisch am Beispiel einzelner Lichtstrahlen erläutern. Hierzu unterscheidet man zuerst zwei Arten der Reflexion, die direkte und die diffuse Reflexion.

2.5.1 Direkte Reflexion

Für plane Spiegelflächen gilt das Fermat'sche Prinzip, welches besagt, dass der Ein- und Ausfallswinkel in Bezug auf das senkrechte Lot immer übereinstimmen [6, Ryb2010S.187]. Das Resultat ist in Abbildung 2.1 dargestellt und folglich besitzt der Einfallswinkel γ den selben Betrag wie der Ausfallswinkel γ' .

$$\gamma = \gamma' \quad (2.8)$$

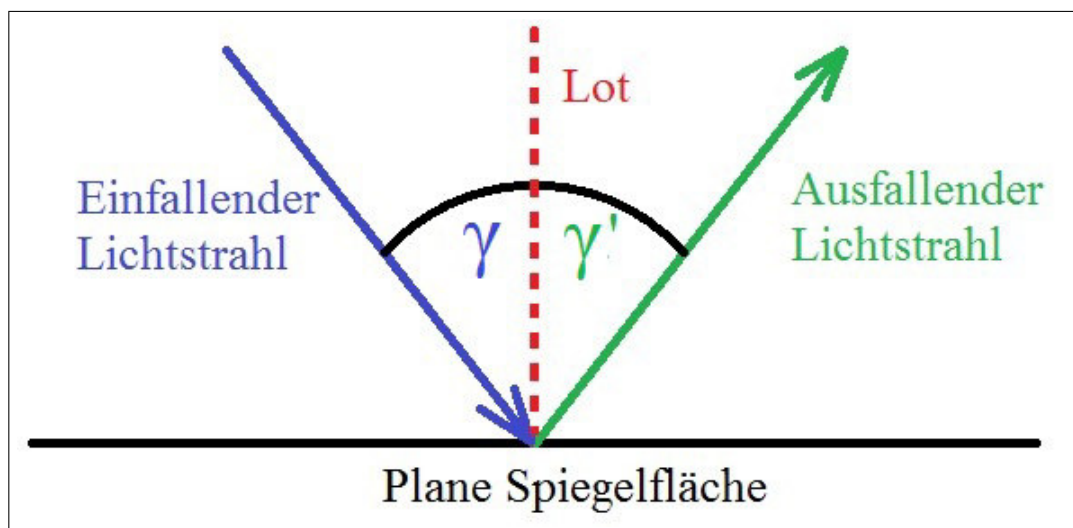


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung der Reflexion an einem Planspiegel
[6, Ryb2010S.187]

2.5.2 Diffuse Reflexion

Das Reflexionsgesetz gilt auch für raue Oberflächen. Hierfür muss wie in Abbildung 2.2 skizziert, jeder auftreffende Lichtstrahl einzeln betrachtet werden [6, Ryb2010S.188]. Durch die unterschiedlichen Ausrichtungen der Oberfläche verschiebt sich das senkrecht dazu stehende Lot. Folglich besitzen die einfallenden Lichtstrahlen zueinander unterschiedliche Einfalls- und somit auch Ausfallswinkel. Es entsteht kein Spiegelbild, obwohl die Lichtstrahlen reflektiert werden.

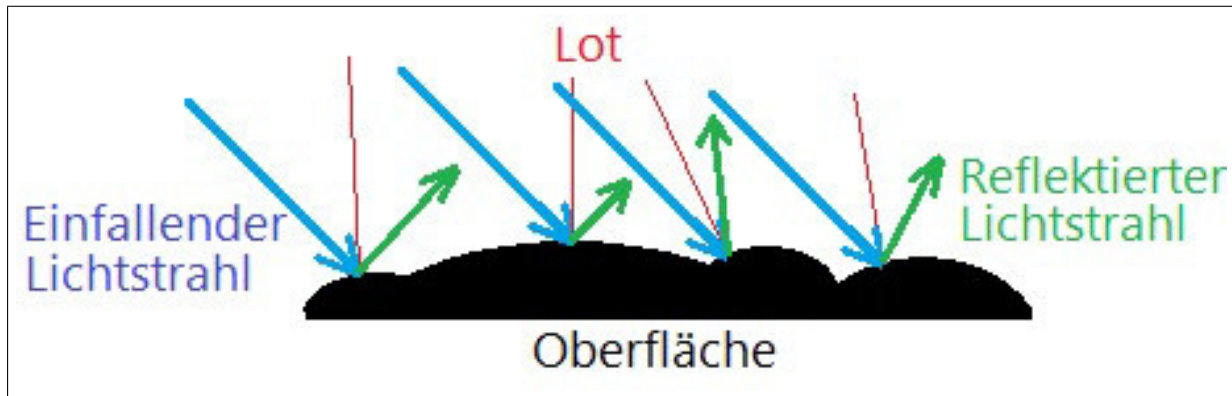


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Reflexion an rauen Oberflächen
[6, Ryb2010S.188]

2.6 Blendung

Allgemein wird die Blendung in zwei Bereiche unterteilt. Zum Einen die physiologische und zum Anderen die psychologische Blendung. Im Gegensatz zur physiologischen Blendung, ist die psychologische Blendung messtechnisch weder quantifizierbar, noch optisch-visuell nachweisbar [7, IFA2010S.3-6]. Aus diesem Grund wird hier nicht weiter auf die psychologische Blendung eingegangen. In der Leuchttechnik ist es üblich die physiologische Blendung mit einem Blendungsindex zu beschreiben [8, Schi2012S.503]. Dieser berücksichtigt die Leuchtdichte L_S der Blendquelle, die Umfeldleuchtdichte L_U , auf welche das Auge adaptiert ist, die Größe der Blendquelle als Raumwinkel Ω_S und die Position im Gesichtsfeld bezüglich der Blickrichtung mit einem Positionsindex w [8, Schi2012S.503]. Häufig wird auch das Alter A des Beobachters berücksichtigt [8, Schi2012S.503]. Es ergibt sich somit folgender Zusammenhang:

$$G \approx w(\theta, A) \cdot \frac{L_S^{n_1} \cdot \Omega_S^{n_2}}{L_U^{n_3}} \quad (2.9)$$

Die Exponenten n_1, n_2 und n_3 werden situationsbedingt, je nach Index leicht unterschiedlich, festgelegt. Mit einer speziellen Kamera kann ein Leuchtdichtebild in Falschfarbendarstellung erzeugt und am Computer ausgewertet werden. Dieses Bild gibt Auskunft über die zweidimensionale Leuchtdichteverteilung und kann zur Bestimmung der Blendwirkung herangezogen werden. Um die gewonnenen Kenntnisse der zweidimensionalen Daten auf Dreidimensionale interpolieren zu können, müssen Aufnahmen aus bestimmten Richtungen und Blickwinkeln erzeugt werden.

2.7 Messsensorik

Messen ist das quantitative Erfassen einer Größe mit Hilfe geeigneter Messgeräte und Sensorik. [9, Schr2004S.236]

2.7.1 Thermoelemente

Die Abbildung 2.3 zeigt ein Prinzipschaltbild eines Thermoelementes. Die unterschiedlichen Materialien A und B sind an den Punkten T_m und T_v verlötet oder verschweißt. Gibt es in den beiden Punkten eine Temperaturdifferenz, so entsteht eine Spannung, welche als Thermospannung bezeichnet wird.

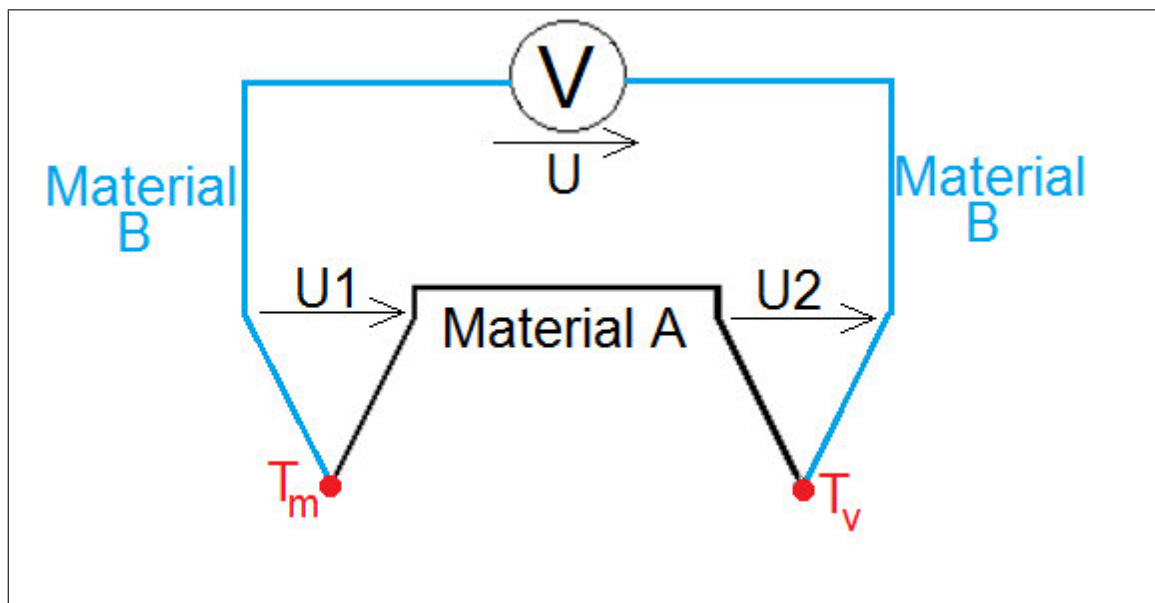


Abbildung 2.3: Veranschaulichung des Funktionsprinzips eines Thermoelementes

An der Berührungsstelle T_m und T_n zweier Metalle treten Elektronen von dem einen Metall in das andere Metall über [9, Sru2004S.236]. Das Material mit der geringeren Austrittsarbeit gibt Elektronen ab und wird positiver, wohingegen der Akzeptor negativer wird [9, Sru2004S.236]. Als Resultat bilden sich an den Grenzflächen elektrische Felder aus [9, Sru2004S.236]. An der Berührungsstelle T_m bildet sich die Kontaktspannung U_1 , die nach der Boltzmann-Verteilung der dort herrschenden Temperatur T_1 und dem Verhältnis der Elektronenzahldichte n_A und n_B proportional ist [9, Sru2004S.236]:

$$U_1 = \frac{k \cdot T_1}{e} \cdot \ln \left(\frac{n_A}{n_B} \right) = \left(\frac{k}{e} \cdot \ln \frac{n_A}{n_B} \right) \cdot T_1 = k_{AB} \cdot T_1 \quad (2.10)$$

In dieser Gleichung symbolisiert k die Boltzmann-Konstante, e die Elementarladung und k_{AB} einen Zusammenschluss der Materialkonstanten [9, Sru2004S.236]. Analog der Kontaktspannung U_1 gilt:

$$U_2 = k_{BA} \cdot T_2 \quad (2.11)$$

Bei einem Maschenumlauf wie in Abbildung 2.3 und der Bedingung, dass bei Temperaturgleichheit keine Thermospannung auftritt, folgt:

$$k_{AB} = -k_{BA} \quad (2.12)$$

Mit der vorherigen Formel 2.12 kann der allgemeine Spannungsverlauf des Thermoelementes wie folgt beschrieben werden:

$$U = U_1 + U_2 = k_{AB} \cdot (T_1 - T_2) \quad (2.13)$$

2.7.2 Radiometer

Die häufigste Ausführung eines Radiometers, das Gardon-Radiometer, ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Der Grundkörper besteht aus einem Kupfergehäuse mit einer zylindrischen Bohrung [10, Lieh2015]. Mit der darauf aufgeschweißten Konstantanfolie bildet sich, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, ein Thermoelement [10, Lieh2015]. Im Zentrum der Konstantanfolie wird ein weiterer Kupferdraht angeschweißt und es entsteht ein zweites Thermoelement [10, Lieh2015]. Die Spannungen der beiden Thermoelemente heben sich bei gleicher Temperatur auf [10, Lieh2015]. Wird nun aber die Konstantanfolie bestrahlt, erwärmt sich diese. Im Gegensatz dazu wird der äußere Kupferkörper durch Wasser gekühlt und es entsteht eine Temperaturdifferenz. Über die Bildung der Summe der beiden Thermospannungen können Rückschlüsse auf die eingestrahelte Leistung gemacht werden.

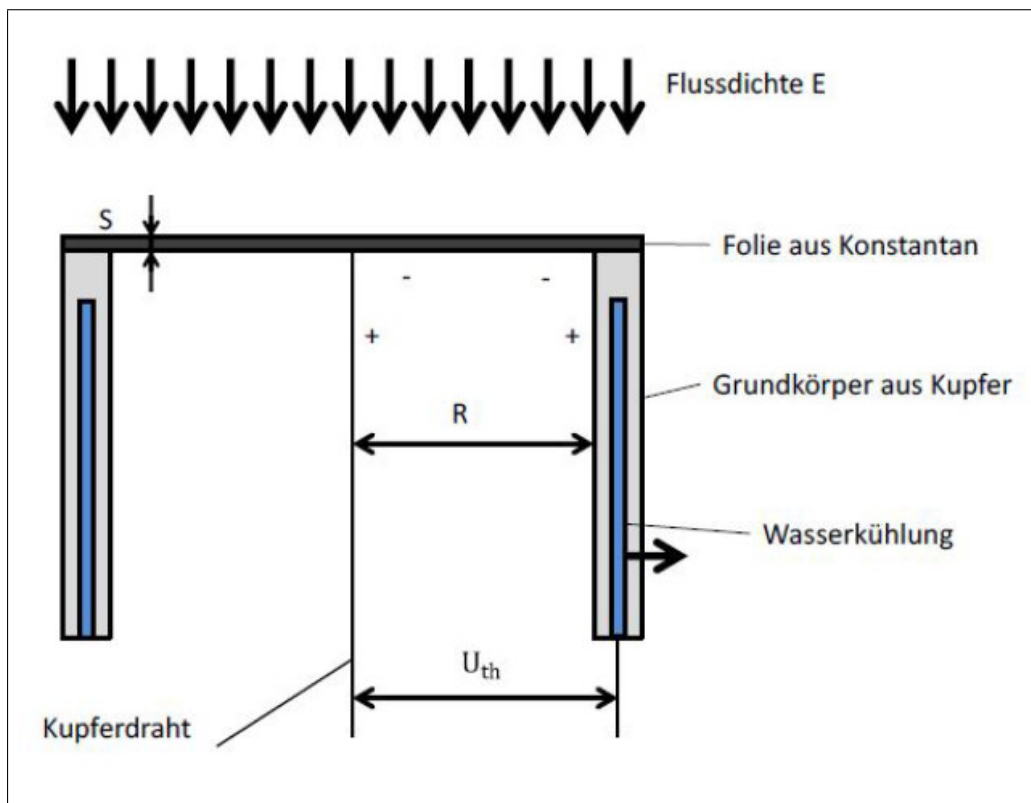


Abbildung 2.4: Schematische Schnittdarstellung eines Gardon-Radiometers

2.7.3 SunCatch STJ

Ein SunCatch ist ein, auf dem kalorimetrischen Prinzip basierender, absoluter Strahlungsflussdichtemesser [11, Tk2015S.9]. Mit Hilfe von zwei Temperaturmessungen θ_1 und θ_2 des Kühlwassers, dessen spezifische Wärmekapazität c_P und dem messbaren Massenstrom \dot{m} ist, kann der absorbierte Wärmestrom wie folgt bestimmt werden [11, Tk2015S.9]:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_P \cdot \Delta\theta \quad (2.14)$$

Die einstrahlende Sonnenenergie passiert die definierte Blendenöffnung und trifft auf den Absorber. Die absorbierte Wärmemenge wird über einen definierten Volumenstrom Wasser abtransportiert. Durch das Verhältnis der Temperaturen des ein- und ausströmenden Wassers, kann über die oben gezeigte Gleichung der eingetroffene Wärmestrom berechnet werden. Über die definierte Blendenöffnung kann der absorbierte Wärmestrom zur gesuchten Strahlungsflussdichte umgerechnet werden. Dieser Strahlungsflussdichtemesser ist im Allgemeinen für die Kalibration von Radiometern gedacht. Abbildung 2.5 zeigt den beispielhaften Aufbau eines solchen Messgerätes.

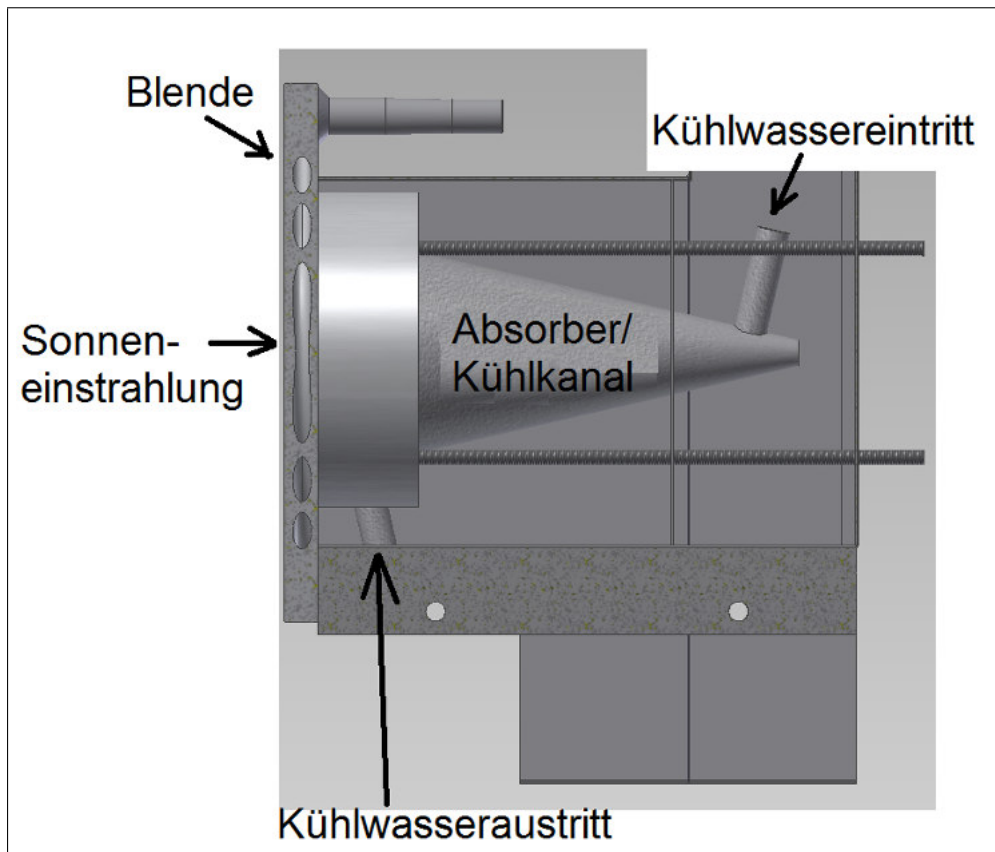


Abbildung 2.5: Seitliche Schnittdarstellung des SunCatch STJ

2.7.4 Der temperaturabhängige Widerstand

Metalle bestehen in makroskopischer Betrachtung aus einer festen Gitterstruktur der Atomkerne, welche durch ein Elektronengas umgeben sind [9, Sru2004S.231-232]. Wird eine Spannung angelegt, treibt diese die ungeordneten Elektronen durch den Leiter und es fließt ein Strom I [9, Sru2004S.231-232]. Wie im Unterkapitel Wärmeübertragungsarten beschrieben, führt eine Erhöhung der Temperatur zu einer verstärkten Gitterschwingung. Durch die erhöhte Gitterschwingung stoßen die fließenden Elektronen vermehrt gegen die Metallionen, wodurch der Stromfluss behindert wird [9, Sru2004S.231-232]. Daraus resultiert, dass der ohmsche Widerstand von Metallen bei steigenden Temperaturen zunimmt [9, Sru2004S.231-232]. Durch eine Taylor-Entwicklung, lässt sich dieses Phänomen wie folgt beschreiben:

$$R(T) = R_0 \cdot [1 + a(T - T_0) + b(T - T_0)^2] \quad (2.15)$$

Hat der metallische Leiter bei einer Starttemperatur T_0 einen definierten Widerstand R_0 , lässt sich der Widerstand $R(T)$ bei der Temperatur T mit Hilfe der Materialkonstanten a und b bestimmen [9, Sru2004S.231-232]. Wird ein Material, welches eine starke Linearität im Temperaturverlauf und einen fixen Widerstandswert bei 273,15 K besitzt, verwendet, lässt sich die obere Gleichung reduzieren [9, Sru2004S.231-232]:

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha_s \cdot T) \quad (2.16)$$

Der PT100 ist ein spezieller Widerstand aus Platin, welcher bei 273,15 K den Widerstandswert von 100 Ω besitzt. Zudem zeichnet sich Platin durch ein sehr lineares Temperaturverhalten aus, welches die Berechnung der Temperatur in Abhängigkeit des Widerstandes wie oben gezeigt, vereinfacht.

2.7.5 Der Dehnungsmessstreifen

Dehnungsmessstreifen sind passive Sensoren, welche im einfachsten Fall aus einem langen elektrischen Leiter bestehen. Bei geringer Stauchung oder Streckung verändern diese ihren elektrischen Widerstand. Sie existieren in vielen unterschiedlichen Bauformen, Größen oder Materialien. Um Spannungen in Bauteilen vermessen zu können, werden diese mit Hilfe eines speziellen Klebers an einem Werkstück befestigt. Der ohmsche Widerstand R eines elektrischen Leiters hängt von seiner Länge l , seiner Querschnittsfläche A und seinem material-spezifischen Widerstand ρ_{el} ab [9, Sru2004S.251-252].

$$R = \frac{l}{A} \cdot \rho_{el} \quad (2.17)$$

Wird der elektrische Leiter gestaucht oder gestreckt, so ändern sich die Länge, die Querschnittsfläche und der spezifische Widerstand [9, Sru2004S.251-252]. Als Folge dessen resultiert ebenfalls eine Widerstandsänderung [9, Sru2004S.251-252]. Wendet man nun die allgemeine Formel für den relativen Gesamtfehler [9, Sru2004S.36] auf die Widerstandsgleichung eines elektrischen Leiters an, so folgt [9, Sru2004S.251-252]:

$$\frac{\Delta y}{y} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \frac{\Delta x_i}{x_i} \quad (2.18)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho_{el}}{\rho_{el}} \quad (2.19)$$

Die letzte Gleichung wird so umgeformt, dass die Querschnittsfläche durch den Durchmesser d ersetzt und die gesamte Gleichung durch die relative Längenänderung $\frac{\Delta l}{l}$ dividiert wird [9, Sru2004S.251-252].

$$\frac{\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)}{\left(\frac{\Delta l}{l}\right)} = 1 - 2 \cdot \frac{\left(\frac{\Delta d}{d}\right)}{\left(\frac{\Delta l}{l}\right)} + \frac{\left(\frac{\Delta \rho_{el}}{\rho_{el}}\right)}{\left(\frac{\Delta l}{l}\right)} \quad (2.20)$$

Die linke Seite der Gleichung, das Verhältnis aus der relativen Widerstandsänderung und der Dehnung ϵ , wird im Allgemeinen als „K-Faktor“ bezeichnet [9, Sru2004S.251-252].

$$K = \frac{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)}{\left(\frac{\Delta l}{l}\right)} \quad (2.21)$$

Im rechten Teil der Gleichung steckt die Poisson'sche Zahl μ , die das Verhältnis aus der relativen Querkontraktion zur relativen Längenänderung beschreibt [9, Sru2004S.251-252].

$$\mu = -\frac{\left(\frac{\Delta D}{D}\right)}{\left(\frac{\Delta l}{l}\right)} \quad (2.22)$$

Somit komprimiert sich die Formel auf:

$$K = \frac{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)}{\left(\frac{\Delta l}{l}\right)} = 1 + 2 \cdot \mu + \frac{\frac{\Delta \rho_{el}}{\rho_{el}}}{\frac{\Delta l}{l}} \quad (2.23)$$

Um den Wärmeausdehnungskoeffizienten α_s eines Materials zu bestimmen, werden die Gleichungen zum Dehnungsmessstreifen mit dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten in Verbindung gesetzt. Das Resultat ist [12, MiMe2010S.1-2]:

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right) = \left[\beta_{DMS} + K_{DMS} \cdot \left(\frac{1 + k_t}{1 - \mu \cdot k_t} \right) \cdot (\alpha_S - \alpha_{DMS}) \right] \Delta T \quad (2.24)$$

In dieser Formel sind weitere Einflussfaktoren, wie die Querdehnungsempfindlichkeit k_t , sowie der Widerstandstemperaturkoeffizient β_{DMS} und der thermische Ausdehnungskoeffizient α_{DMS} des DMS-Gittermaterials, berücksichtigt. Der zu ermittelnde thermische Ausdehnungskoeffizient findet sich in der Variablen α_S wieder. Da die Querdehnungsempfindlichkeit eines einachsialen Dehnungsmessstreifens mit einem Längen-Breiten-Verhältnis von $l \ll b$, unter zwei Prozent beträgt, vereinfacht sich die Formel wie folgt [13, MiMeb2010S.2-3]:

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right) = \left[\beta_{DMS} + K_{DMS} \cdot (\alpha_S - \alpha_{DMS}) \right] \Delta T \quad (2.25)$$

Somit ergibt sich für den gesuchten Längenausdehnungskoeffizienten:

$$\alpha_S = \alpha_{DMS} - \frac{\beta_{DMS}}{K_{DMS}} + \frac{\Delta R}{R \cdot \Delta T \cdot K_{DMS}} \quad (2.26)$$

2.7.6 Die Messbrücke

Die erstmals von Wheatstone 1843 zum Messen eines Widerstandes verwendete Brückenschaltung enthält, wie in Abbildung 2.6 dargestellt, vier Widerstände R_1 bis R_4 , welche paarweise einen Spannungsteiler bilden und an der Brückenspeisespannung U_0 liegen [9, Sru2004S.215].

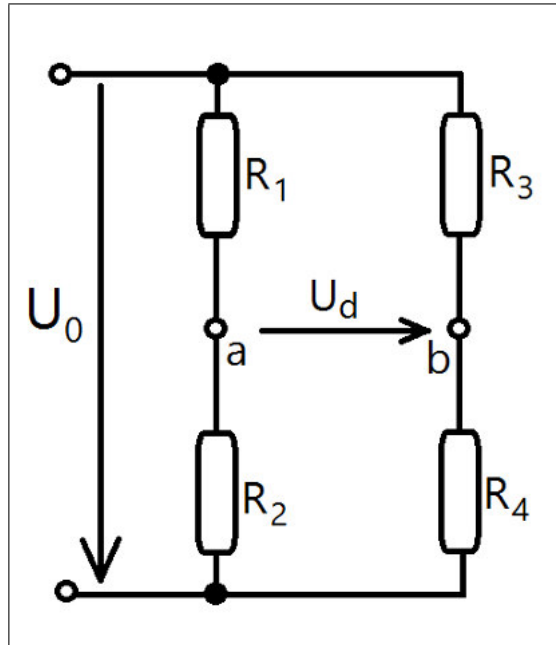


Abbildung 2.6: Schaltkreis einer einfachen Wheatstone-Messbrücke

Verbindet man die Punkte a und b mit einem Voltmeter, so kann man bei Bekanntheit dreier Widerstände den Vierten mit Hilfe eines Maschenumlaufs berechnen [9, Sru2004S.215]:

$$U_d = U_3 - U_1 = U_0 \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (2.27)$$

Verwendet man einen variablen Widerstand, wie zum Beispiel ein Potentiometer, so kann die Messbrücke ausgeglichen werden und die Diagonalspannung U_d beträgt 0 V. Bei dieser Abgleichbedingung ergibt sich [9, Sru2004S.215]:

$$R_2 \cdot R_3 = R_1 \cdot R_4 \quad (2.28)$$

Im Gegensatz zu den Methoden der Widerstandsbestimmung mit Hilfe einer Konstantstrom- oder Konstantspannungsquelle kann mit einer Messbrücke bei geeigneter Widerstandswahl eine sehr viel empfindlichere Ermittlung von Widerstandswerten durchgeführt werden. Bei einer bekannten Messbrücke können des Weiteren Widerstandsänderungen ermittelt werden. Bevorzugt wird die Messbrücke vor allem bei Widerständen, die nur einer sehr geringen Änderung unterliegen. Aus diesem Grund ist es unerlässlich die bereits erwähnten Dehnungsmessstreifen, sowie PT100 mit Hilfe einer Messbrücke auszuwerten.

2.7.7 Kamera im Heliostatfeld

Die in dieser Arbeit verwendete Kamera befindet sich im Heliostatfeld und nimmt während der Bestrahlung des Materialtestfeldes Fotos von dem Strahlenschutz der Forschungsebene auf. Die aufgenommenen Schwarz-Weiß-Bilder beinhalten die unterschiedlich stark reflektierenden Bereiche der Forschungsebene. Diese Schwarz-Weiß-Aufnahmen beinhalten eine zusätzliche Information, den sogenannten Grauwerten. Je höher ein Grauwert ist, desto höher war die eingestrahlte Lichtmenge bezogen auf die Belichtungszeit und die Blendenöffnungsgröße. Aufgrund der geringen Auflösungskraft des menschlichen Auges, werden die Abbildungen gerne in ein sogenanntes Falschfarben-Bild umgewandelt. Hierbei werden die Grauwertbereiche in unterschiedliche Farbbereiche eingeteilt und verlaufen ähnlich dem sichtbaren Spektrum von violett zu rot. Wobei rot den hohen Leistungen und violett den niedrigen Leistungen entspricht.

Arithmetischer Mittelwert und empirische Standardabweichung

Jede Messung ist mit einem Messfehler behaftet. Um diesen Messfehler möglichst genau eingrenzen zu können, bietet die Statistik mehrere Vorgehensweisen. Zwei wichtige Maßzahlen sind dabei der arithmetische Mittelwert und die empirische Standardabweichung. Der arithmetische Mittelwert gibt die durchschnittliche Größe aller auftretenden Messwerte an. Die Standardabweichung wiederum ist ein Maß für die Streuung der Messwerte um einen bestimmten Erwartungswert. Der Mittelwert berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.29)$$

Hierbei stehen die Variablen x für den Messwert, i als Messwertindex und n für die gesamte Anzahl an Messwerten. Weiter folgt für die Standardabweichung:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.30)$$

3 Konzeptionierung des Materialtestfeldes

Dieses Kapitel beinhaltet grundlegende Überlegungen für die Realisierung des Materialtestfeldes im Strahlenschutzbereich des Solartums Jülich.

3.1 Positionierung des Materialtestfeldes

Der Strahlenschutzbereich der Forschungsebene besteht aus mehreren miteinander verschraubten Strahlenschutzplatten. Durch diesen modularen Aufbau des Strahlenschutzes kann, je nach Versuchsaufbau, die Öffnung des Strahlenschutzes vergrößert oder verkleinert werden. Damit die direkt um dem Receiver befindlichen Strahlenschutzelemente für künftige Projekte demontiert werden können, wurde der Aufbau des Materialtestfeldes weiter nach außen verschoben. Somit ergibt sich der in Abbildung 3.1 gezeigte Montagebereich.

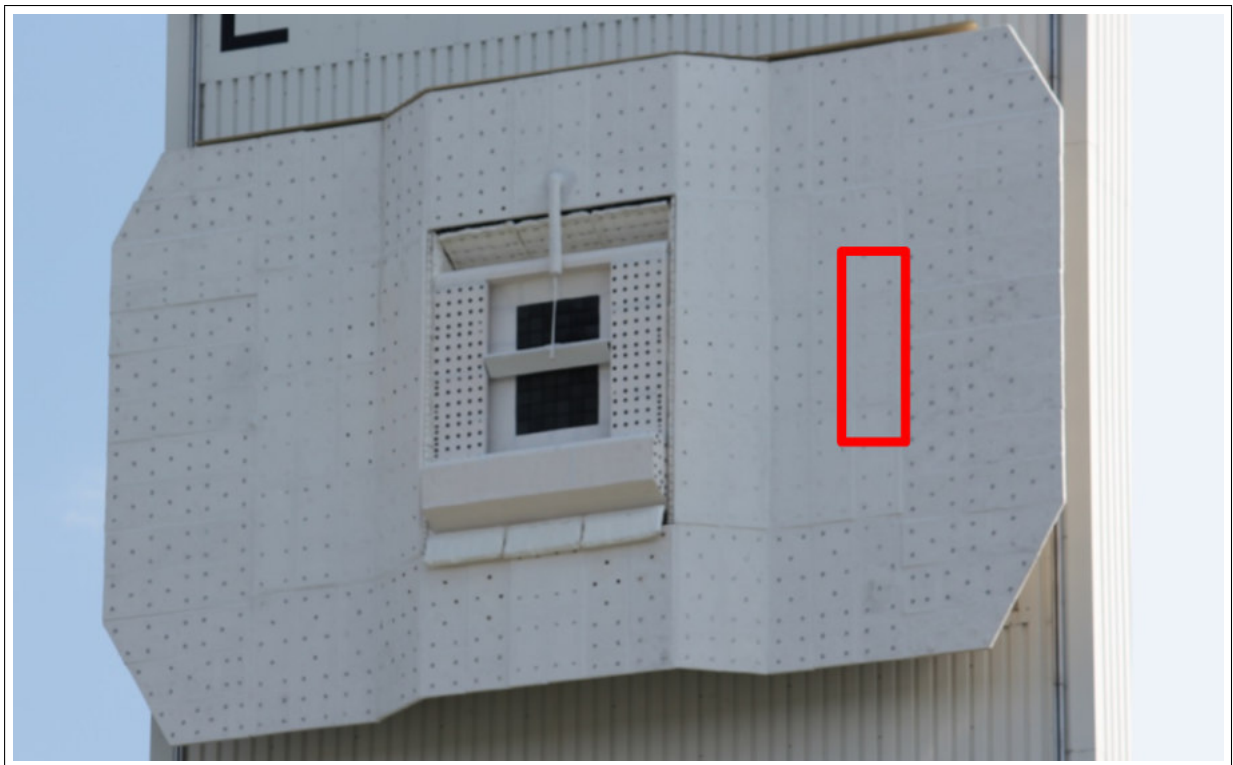


Abbildung 3.1: Darstellung des geplanten Montagebereichs des Materialtestfeldes

3.2 Das Messkonzept

Grundlegend wurden Überlegungen durchgeführt, welche Messgrößen im Strahlenschutzbereich von Bedeutung sind. Im Rahmen dieser Konzeptüberlegung wurden zudem umsetzbare Möglichkeiten zur Erfassung der Messgrößen in Erwägung gezogen. In dem Flussdiagramm 3.2 wurde eine einfache Unterteilung durchgeführt. Dabei werden die Messgrößen abhängig von ihrer zu untersuchenden Messdauer, in Langzeitverhalten und Messreihenaufnahme unterteilt. Unter die Rubrik Messreihenaufnahme fallen die Messgrößen, welche sich durch eine einzige Messreihe bestimmen lassen, wohingegen die Rubrik Langzeitverhalten Messgrößen beinhaltet, die erst ab zwei oder mehr Messreihen Resultate liefern. Um bei der ersten Inbetriebnahme Rückschlüsse auf die Funktionalität der verwendeten Sensorik zu erhalten bezieht sich der weitere Verlauf dieser Arbeit auf die optische Überprüfung, die Bestimmung des Wärmeleitkoeffizienten, sowie des linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Die Wärmeleitfähigkeit wird mit Hilfe von Thermoelemente und einer Kamera im Heliostatfeld bestimmt. Der thermische Ausdehnungskoeffizient resultiert über die Widerstandsänderung eines an der Probe befestigten Dehnungsmessstreifens und die optische Prüfung findet durch die Verwendung eines USB-Mikroskops mit 500-facher Vergrößerung statt.

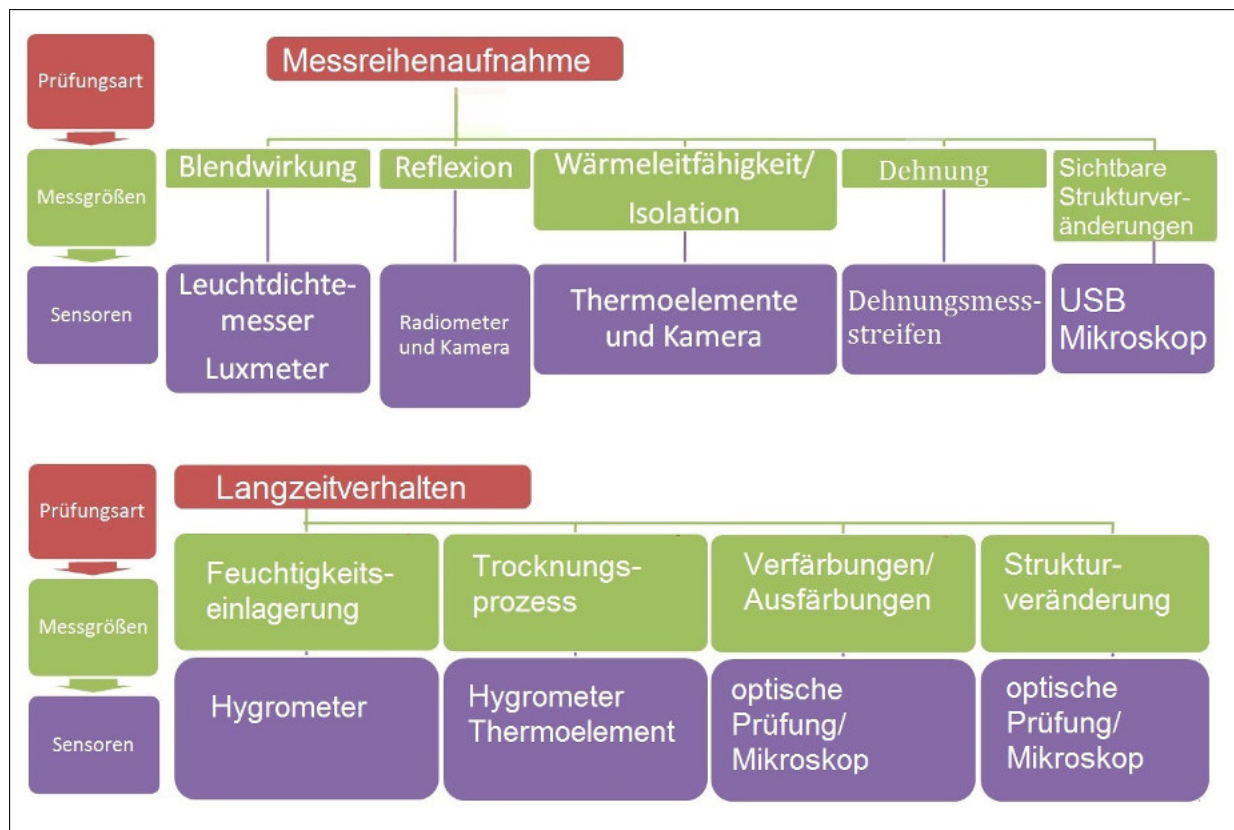


Abbildung 3.2: Überblick der erfassbaren Messgrößen und ihre Bestimmung

3.3 Die auftreffende Strahlungsflussdichte

Zur Erfassung der in Abbildung 3.2 aufgeführten Messgrößen kann es erforderlich sein, die auf das Materialtestfeld auftreffende Strahlungsflussdichte nicht als homogen zu betrachten. Dies ist auf die Streuung der Heliostaten und Abweichungen im Zielpunkt der Heliostaten untereinander zu erklären. Anhand der Tatsache, dass die Strahlungsflussdichte für das Materialtestfeld nur mit Hilfe des Radiometers in der Mitte gemessen wird, muss aus reproduzierbaren Gründen die Strahlungsflussdichte, welche auf die Proben trifft, korrigiert werden. Je nach Größe und Verteilung der Proben müssen somit Korrekturfaktoren für die Bestimmung der Messgrößen ermittelt werden. Während der Messungen können über eine Kamera im Heliostatfeld Grauwertbilder erfasst werden. Über Referenzpunkte am Radiometer und an den Proben kann über einen Grauwertvergleich eine Korrektur der auf die Proben auftreffende Strahlungsflussdichte vorgenommen werden. Als Referenzpunkte dienen die lackierten Aluminiumreflexionskörper. Die Lackierung ist nötig, damit eine möglichst Diffuse Reflexion am Aluminiumkörper stattfindet. Andernfalls würde die Kamera im Heliostatfeld eine Helligkeitsreflexion aus der Atmosphäre messen. Zur Bestimmung der Grauwerte wird in dem von der Kamera erfassten Bild jedem einzelnen Pixel ein bestimmter Grauwert zugeordnet. Eine bereits vorher entwickelte LabView-Software überträgt die Grauwerte der einzelnen Pixel in eine CSV-Datei. Hierbei erhält jeder Pixel eine eigene Zelle in der Tabelle. In Folge dessen kann aus einer bildgroßen Matrix der passende Grauwert des Referenzpunktes ermittelt werden. Der Quotient aus dem Grauwert nahe dem Radiometer und dem Referenzpunkt an der Probe bildet einen Korrekturfaktor zur Bestimmung der Strahlungsflussdichte.

3.4 Die Probenauswahl

Für die erste Inbetriebnahme werden Proben gewählt, welche zum Einen einer Eignungsprüfung für den Strahlenschutzbereich unterzogen werden und zum Anderen eine Validierung der vom Materialtestfeld bestimmten Messgrößen zulassen. Zu den ausgewählten Proben zählen zwei Wärmedämmstoffe, eine zerspanbare Keramik und zwei unterschiedlich gefärbte Aluminium Fasern.

3.4.1 Die verwendeten Wärmedämmstoffe

Die ausgewählten Wärmedämmstoffe, Aluminiumsilikatwolle und Erdalkalisilikatwolle gehören zur Gruppierung der Keramikfasern. Diese Gruppierung zeichnet sich durch eine hohe Temperaturbeständigkeit aus. Bei diesen Proben werden die Wärmeleitkoeffizienten zur Validierung der erfassten Temperaturmesswerte bestimmt und mit den Herstellerangaben im Datenblatt verglichen.

Aluminiumsilikatwolle Kerform KVS144

Aluminiumsilikatwolle wird derzeit als Material für den Strahlenschutz am Solarturm Jülich verwendet. Unter dem Probennamen Kerform KVS144 verbirgt sich eine in Vakuum verpresste Aluminiumsilikatfaser-Probe der Firma Rath. Dieses Material ist ein guter Isolator und sehr temperaturbeständig. Wie bei allen Aluminiumsilikatwollen sind kleine Fasern des Materials lungengängig und können nicht vom Organismus abgebaut werden. Aus diesem Grund ist die Aluminiumsilikatwolle, ähnlich wie Asbest, als krebserregend eingestuft. Als Ersatzstoffe werden unter anderem Erdalkali basierende Materialien angeboten.

Erdalkalisilikatwolle EVac EVS131

Erdalkalisilikatwolle weist ähnliche Eigenschaften wie die Aluminiumsilikatwolle auf. Diese besitzt einen gleichgroßen Wärmeleitkoeffizienten, aber die lungengängigen Fasern können vom Körper abgebaut werden. Demnach ist Erdalkalisilikatwolle als unbedenklich eingestuft. Bei einer hohen Temperaturbelastung ab 1200 °C kann sich jedoch Cristobalit bilden [14, Sal207S.228], welches ebenso wie Aluminiumsilikatwolle, als krebserregend eingestuft ist. Unter der Probenbezeichnung EVac EVS131 steckt eine in Vakuum verpresste Erdalkalisilikatfaser-Probe. Außer der Validierung der Thermoelemente könnte die Probe für weitere Untersuchungen in ein externes Labor geschickt werden, um einen genaueren Aufschluss über eine mögliche Cristobalitbildung zu erhalten. Allerdings konnte dies nicht mehr im Rahmen dieser Bachelorarbeit umgesetzt werden.

3.4.2 MACOR

MACOR ist eine zerspanbare Keramik. Dieses Material besitzt eine Kombination aus der Belast- und Bearbeitbarkeit von Metallen, sowie der hohen Temperaturbeständigkeit und Isolationseigenschaften von Keramiken. Aus diesem Grund ist dieses Material eine denkbare Alternative im solaren Strahlenschutz. Ebenso wie die Wärmedämmstoffe, soll anhand der Messungen am MACOR eine Validierung der Messanlage stattfinden. Hierbei wird der Temperatur- und Wärmeleitkoeffizient, sowie der thermische lineare Ausdehnungskoeffizient bestimmt.

3.4.3 Aluminiumfasern

Der Vertreiber Hiltex ist unter Anderem ein Lieferant für Aluminiumfaserdämmstoffe. In Form von kleinen Säcken werden die Aluminiumfasern zur Abdichtung von kleinen Spalten im Strahlenschutzbereich verwendet. Aktuell werden die Aluminiumfasern in weiß verwendet. Diese reflektieren durch ihre weiße Farbe diffus, was bei der direkten Betrachtung im Betrieb der Forschungsebene zu einer enormen Blendung führen kann. Durch schwarz gefärbte Fasern könnte die Blendung auf Kosten des erhöhten Absorptionskoeffizienten reduziert werden. Im Laufe des Versuchs sollen somit die Temperaturverläufe der schwarzen und weißen Aluminiumfasern verglichen werden. Des Weiteren sollen die schwarzen Aluminiumfasern auf mögliches Ausbleichen oder Abfärben untersucht werden. Aus Kosten- und Zeitgründen kann eine Blendwirkungsermittlung durch externe Fachkräfte nicht mehr innerhalb dieser Bachelorarbeit behandelt werden.

3.5 Der Probenhalter

Um die bereits vorgestellten Proben am Materialtestfeld befestigen zu können müssen Probenhalter angefertigt werden. Der Probenhalter aus Abbildung 3.3 und Abbildung 3.4 besteht aus einem Aluminiumreflexionskörper, zwei Einschraubstopfen, zwei Pneufitanschlüssen, einer VA-Platte mit aufgeschweißtem VA-Gewindebolzen und drei Aluminiumverbindungsstücken. Der gesamte Probenhalter kann von Innen bestückt und am Materialtestfeld angebracht werden.

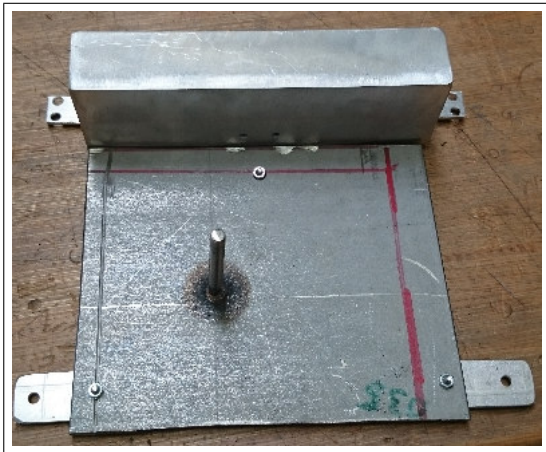


Abbildung 3.3: Frontalansicht des Probenhalters

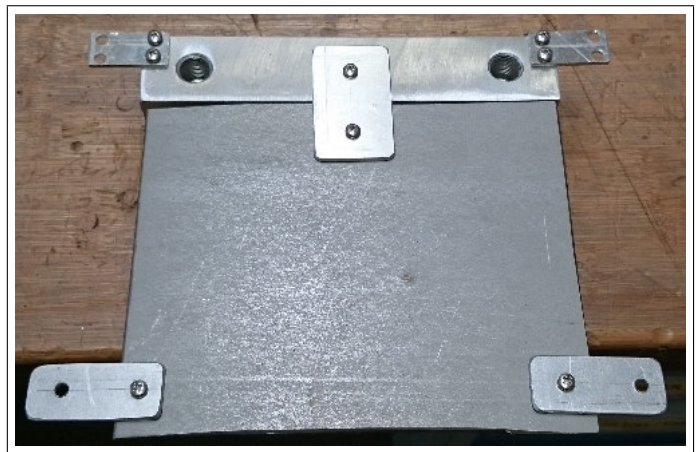


Abbildung 3.4: Rückansicht des Probenhalters

3.6 Bearbeitung des Strahlenschutzelementes

Aus Kompatibilitätsgründen zwischen SunCatch STJ und dem Probenhalter werden die Proben auf die Größe von 160 mm x 160 mm ausgelegt. Nachdem die Proben und die Probengröße festgelegt wurden, folgt die Bearbeitung des Strahlenschutzelementes. In Abbildung 3.5 wurden in einem Strahlenschutzelement sechs Taschen in der Größe 160 mm x 160 mm gesägt. Diese Taschen werden jeweils, wie in Abbildung 3.6, mit zwei Komponenten gefüllt. Zum Einen mit einem lackierten Reflexionskörper aus Aluminium und zum Anderen mit einer Probe. Um die auftreffende Strahlungsflussdichte zu messen wurde, zusätzlich über die mittlere rechte Probe, ein Radiometer verbaut.

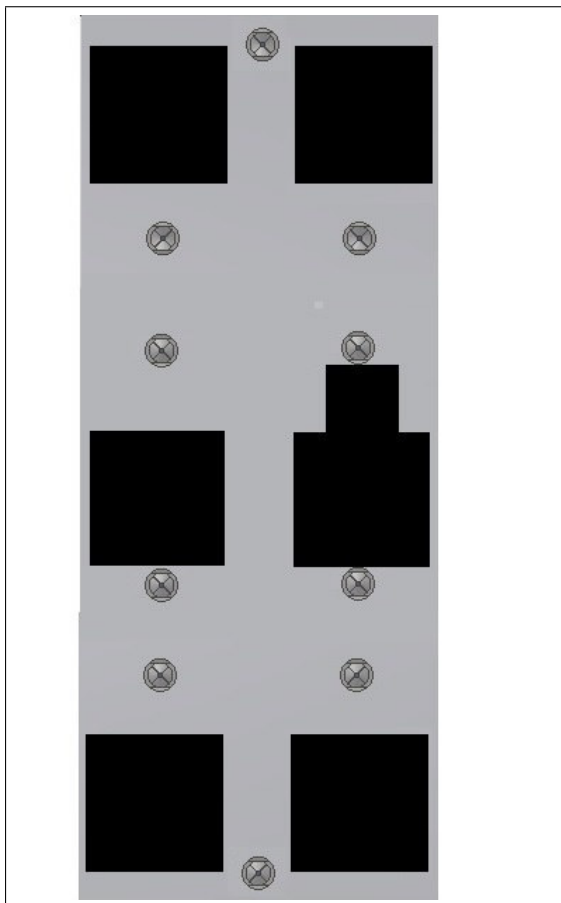


Abbildung 3.5: Skizze der nicht bestückten, aber bearbeiteten Strahlenschutzplatte

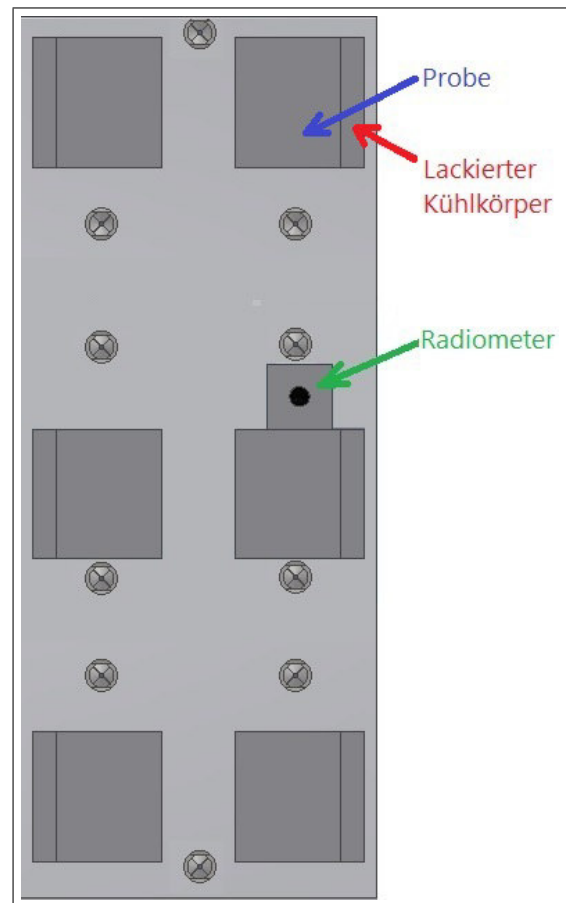


Abbildung 3.6: Skizze der bestückten und bearbeiteten Strahlenschutzplatte

3.7 Das Messsystem

Nachdem die zu bestimmenden Messgrößen mit zugehöriger Sensorik festgelegt wurden, konnte eine Planung des Messsystems vorgenommen werden. Die Abbildung 3.7 zeigt die vier Hauptbestandteile des Materialtestfeldes. Dieses besteht aus einem aktiven Kühler, dem bestückten Strahlenschutzelement, dem Schaltschrank und einem Computer. In diesem Bild ist in blau der Kühlkreislauf, in orange die Sensorleitungen und in violett die RS485-Leitung dargestellt, sodass die Verbindung der einzelnen Komponenten erkenntlich wird. Die analogen Messwerte der Sensoren werden mit Hilfe von Messkarten in ein digitales Signal umgewandelt. Dieses Signal wird über einen RS485-Bus an den PC übertragen und mit Hilfe einer LabView-Software ausgewertet. Damit die Farbe der lackierten Aluminiumreflexionskörper bei erhöhter Temperatur haftet, werden diese aktiv gekühlt.

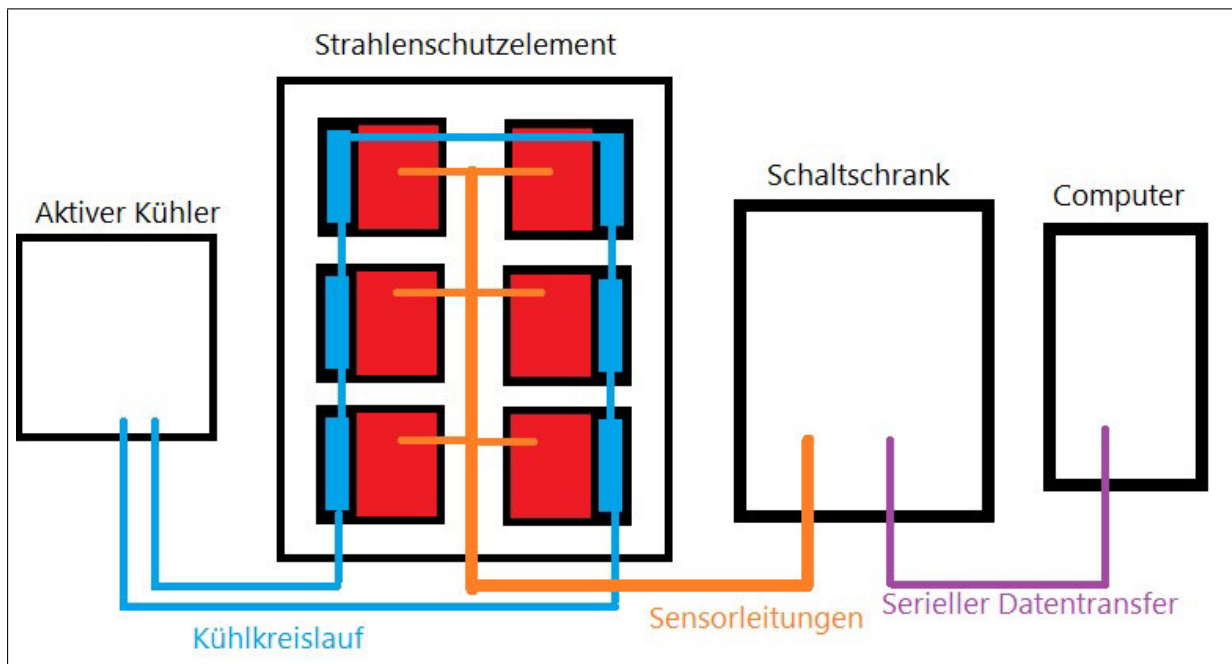


Abbildung 3.7: Schematische Darstellung der Baugruppen und der Verbindungen

4 Realisierung des Konzepts

4.1 Aufbau des Messsystems

Um die Konzeptplanung umsetzen zu können wurde der Signalfluss in Abbildung 4.1 angefertigt. Zusätzlich zu den zehn Thermoelementen und den zwei Dehnungsmessstreifen für die Probencharakterisierung folgen bei der Implementierung des SunCatch STJ weitere zwei Thermoelemente und vier PT100. Um die Zugehörigkeit der Sensoren zu visualisieren, wurden die Komponenten des SunCatch STJ in rot und die der Proben in grün dargestellt. Die Erfassung der Messgrößen erfolgt im Anschluss über einen mit Messkarten bestückten Schaltschrank. Über einen RS485-Bus werden die erfassten Messgrößen an einen Computer übertragen und dort visualisiert und gespeichert. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird detaillierter auf die einzelnen Stationen des Messsystems eingegangen.

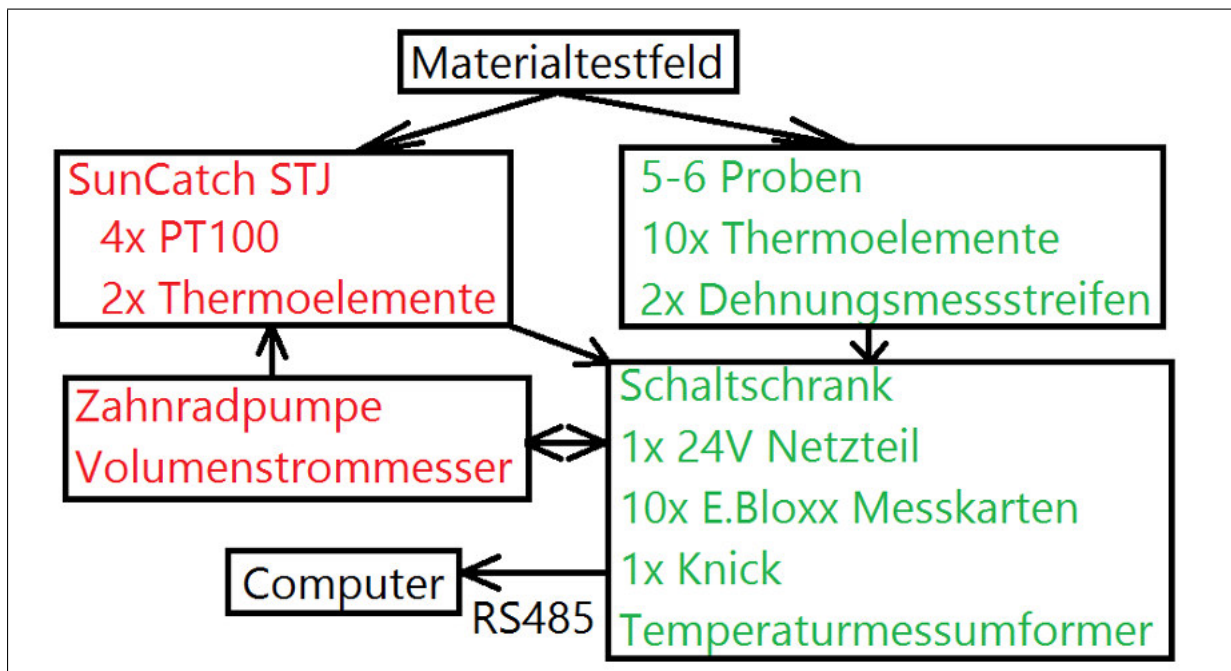


Abbildung 4.1: Flussdiagramm und Kommunikationswege des gesamten Messsystems

4.1.1 Installation des Materialtestfeldes

Für die Umsetzung des Materialtestfeldes wurde zuerst ein Strahlenschutzelement gegen das bearbeitete Materialtestfeld ausgetauscht. Mit Hilfe einer verfahrbaren Arbeitsbühne, eine von außen an dem Solarturm angebrachte Arbeitsplattform, welche für Arbeiten an der Turmfassade oder den Receivern gedacht ist, konnte der Austausch von außen stattfinden. Das montierte Testfeld ist in Abbildung 4.2 von innen und in Abbildung 4.3 von außen in Form einer Fotografie festgehalten. In Abbildung 4.2 kann man zudem die blauen Schläuchen des Kühlkreises, die grünen Thermoausgleichsleitungen und die grauen Steuerleitungen der Sensoren erkennen.

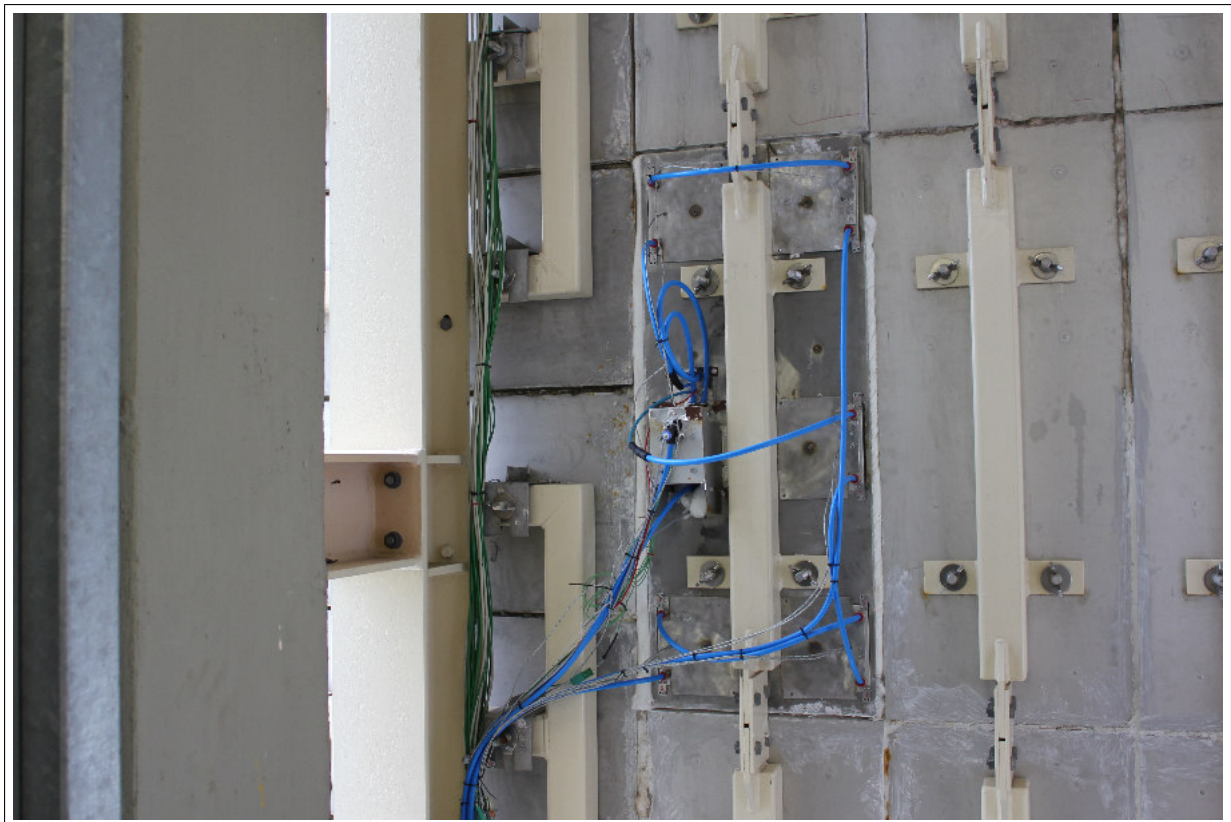


Abbildung 4.2: Abbildung des montierten und bestückten Materialtestfeldes von innen



Abbildung 4.3: Abbildung des montierten und abgedichteten Materialtestfeldes von außen

4.2 Aufbau des Schaltschranks

Die von dem Materialtestfeld wegführenden Sensorleitungen enden in einem Schaltschrank. Dieser Schaltschrank vereint die gesamte für die Erfassung der Messgrößen benötigte Elektronik. Die Hierarchie im Schaltschrank verläuft von unten nach oben, beginnend mit der 230 V Wechselspannung, über die 24 V Versorgungsspannung, der Messleitungsverteilung und der Messkarten. Die freien Hutschienen dienen einer möglichen späteren Erweiterung des Schaltschranks. Da sich der Schaltschrank durch die verwendete Elektronik im geschlossenen Zustand aufheizen kann, wurde ein Lüfter zur Wärmeabfuhr installiert. Des Weiteren befindet sich ein Hauptversorgungsschalter und ein Schalter zur Inbetriebnahme der Zahnradpumpe für das SunCatch STJ am Schaltschrank. Der in Abbildung 4.4 und Abbildung 4.5 dargestellte Schaltschrank wurde durch eine Elektrofackkraft auf Richtigkeit überprüft und in Betrieb genommen.



Abbildung 4.4: Abbildung des geschlossenen Schaltschranks



Abbildung 4.5: Abbildung des geöffneten Schaltschranks

4.2.1 Die verwendeten Messkarten

Im geöffneten Schaltschrank, Abbildung 4.5, sind auf halber Höhe die orange-violetten Messkarten erkennbar. Diese Messkarten der Firma Gantner Instrumens gehören zur Produktserie E.Bloxx. Diese zeichnen sich durch eine hohe Messauflösung von 19bit in einem veränderbaren Messbereich aus. Zudem gibt es spezielle Ausführungen dieser E.Bloxx, welche eine interne Messbrücke zur genaueren Widerstandsbestimmung von Dehnungsmessstreifen oder PT100 besitzen. Die erfassten Messwerte werden über einen RS-485 Bus an den angeschlossenen Computer übertragen. Über die mitgelieferte Software wird der Messbereich, das Format der ermittelten Werte, sowie die Busadresse und Busspezifikationen konfiguriert.

4.3 Visualisierung der Messgrößen

Mit Hilfe von LabView, einem graphischen Programmiersystems der Firma National Instruments, können die an den PC übertragenen Messgrößen über eine ausführbare Datei visualisiert und gespeichert werden. Das LabView Programm wurde so geschrieben, dass eine individuelle Verteilung der Sensorik an den Proben und dem SunCatch STJ vorgenommen werden kann. Zu Beginn wird abgefragt, ob das SunCatch STJ verwendet wird. Abhängig von der Beantwortung wird eine der beiden Oberflächen aus Abbildung 4.6 oder Abbildung 4.7 angezeigt. Im „SunCatch-Betrieb“ wird

die Oberfläche zum Großteil von den SunCatch Mess- und Kalibriergrößen eingenommen. Wobei die Messgrößen der Materialproben nur als Zahlenwerte in einer beschrifteten Textbox auftauchen. Anders sieht die Oberfläche im „Material-Test-Betrieb“ aus. Hier werden alle Messgrößen der SunCatch Sensorik ausgeblendet und durch Diagramme des Temperaturverlaufs und der Widerstandsänderungen über die Zeit ersetzt. Dies ermöglicht eine vorzeitige Deutung der erfassten Messergebnisse. In beiden Betriebsmöglichkeiten können die erfassten Messgrößen in eine CSV-Datei geschrieben und gespeichert werden. Dies ermöglicht eine nachträgliche Betrachtung und Auswertung der zeitlich erfassten Messgrößen.

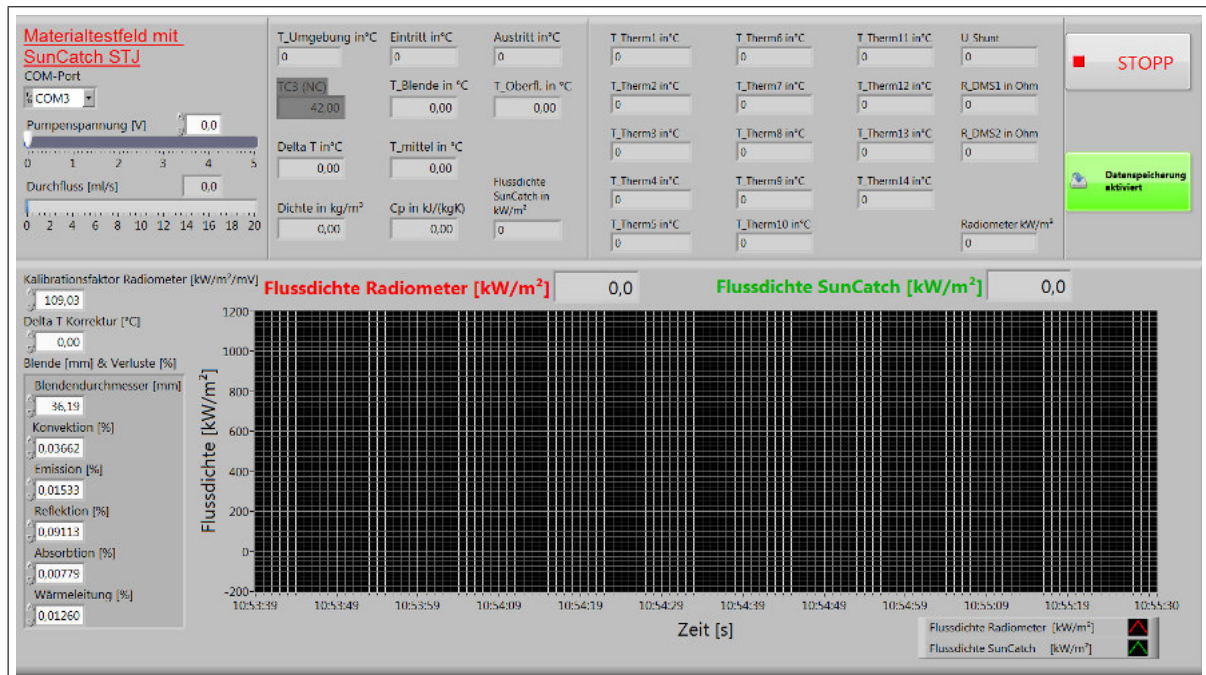


Abbildung 4.6: Graphische Oberfläche des LabView-Programms für den „SunCatch-Betrieb“

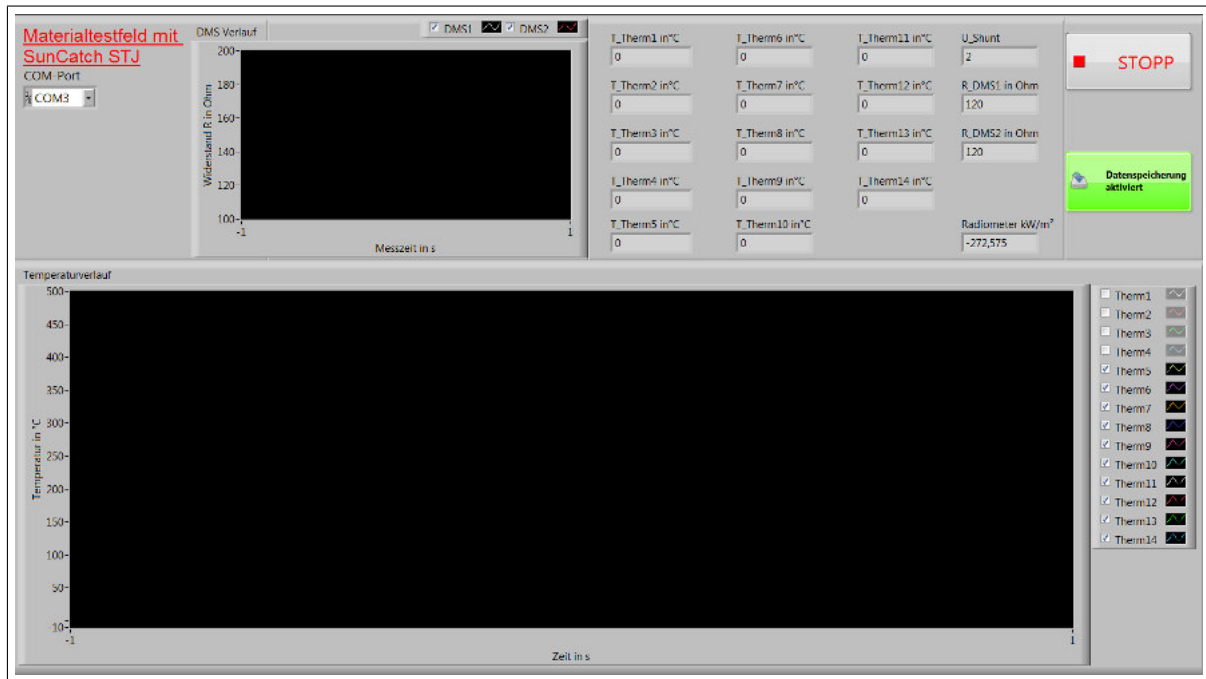


Abbildung 4.7: Graphische Oberfläche des LabView-Programms für den „Materialtestfeld-Betrieb“

5 Inbetriebnahme und erste Tests

Die Inbetriebnahme des Materialtestfeldes erfolgte durch die Erfassung zweier Messreihen. Die erste Messung wurde während eines anderen Experimentes auf der Forschungsebene erfasst. Dabei waren die Heliostate auf den Testreceiver gerichtet. Die auftretende Streustrahlung reichte aus, um das Materialtestfeld zu betreiben. Bei der zweiten Messreihe fokussierten zwanzig Heliostate die ankommende Strahlungsflussdichte auf das Materialtestfeld. Über die bereits bekannten materialspezifischen Daten von den Wärmedämmmaterialien und MACOR fand eine Validierung der erfassbaren Temperaturmessgrößen statt. Außerdem wurde über einen Dehnungsmessstreifen der lineare thermische Ausdehnungskoeffizient von MACOR bestimmt. Zudem konnte auch eine optische Eignungsprüfung von gefärbten Aluminiumfasern durchgeführt werden.

5.1 Probenbelegung und Verteilung der Sensorik

Um materialspezifische Messdaten aufzeichnen zu können, wurden je nach zu untersuchtem Kriterium, Sensorik an die Probe angebracht. Nachfolgend sind die Proben mit der benötigten Sensorik für die Bestimmung der materialspezifischen Kenngrößen aufgelistet:

- Aluminiumfasern mit jeweils einem Thermoelement
→ Eignungsprüfung
- Strahlenschutzelement ohne Sensorik
→ Platzhalter für nicht verwendete Proben
- MACOR mit zwei Thermoelementen und einem Dehnungsmessstreifen
→ Wärmeleitkoeffizient und linearer Ausdehnungskoeffizient
- SunCatch STJ mit drei PT100, zwei Thermoelementen und einem Durchflussmesser
→ Strahlungsflussdichte
- Wärmedämmmaterialien mit jeweils zwei Thermoelementen
→ Wärmeleitkoeffizient

Zudem kann aus der Tabelle 5.1 und der Abbildung 5.1 die Positionierung der Proben entnommen werden.

Position	Messreihe1	Messreihe2
1	weiße Aluminiumfasern	weiße Aluminiumfasern
2	schwarze Aluminiumfasern	schwarze Aluminiumfasern
3	Strahlenschutzelement	MACOR
4	SunCatch STJ	Strahlenschutzelement
5	Kerform KVS144	Kerform KVS144
6	Evac EVS131	Evac EVS131

Tabelle 5.1: Tabellarische Probenbelegung

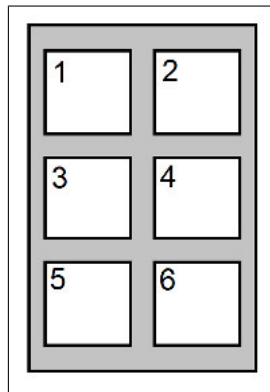


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung der Probenbelegung mit der Betrachtung aus dem Strahlenschutzbereich

Nachdem das Materialtestfeld wie in Tabelle 5.1 bestückt wurde, konnte die Bestrahlung des Materialtestfeldes und die damit zusammenhängende Messgrößenerfassung durchgeführt werden.

5.2 Validierung der ermittelten Temperaturen über die Bestimmung von Wärmeleitkoeffizienten

Dieses Unterkapitel befasst sich mit der Bestimmung des Wärmeleitkoeffizienten von Aluminiumsilikatwolle, Erdalkalisilikatwolle und MACOR, um eine Validierung der Temperaturmessgrößen zu erhalten. Folglich müssen die fehlenden Variablen aus Gleichung 2.7 bestimmt werden. Die Variablen werden, wie in Abbildung 5.2 gezeigt, von links nach rechts bestimmt. Zuerst wird die auf die Probe auftreffende Strahlungsflussdichte untersucht. Im Anschluss wird die von der Probe absorbierte Wärmemenge. Zum Abschluss steht der Wärmetransport innerhalb des Probenkörpers im Fokus. Um die benötigten Messgrößen zu erfassen, wurden die Proben zur Bestimmung des Wärmeleitkoeffizienten wie in Abbildung 5.3 mit Thermoelementen bestückt. Hierbei wurde der schwarz dargestellte Probenkörper mit jeweils zwei violett dargestellten Thermoelementen bestückt. Die Probenbefestigung fand dabei über einen auf der Rückplatte aufgeschweißten Gewindebolzen statt. Der bestückte Probenhalter wurde im Anschluss im Materialtestfeld verbaut.

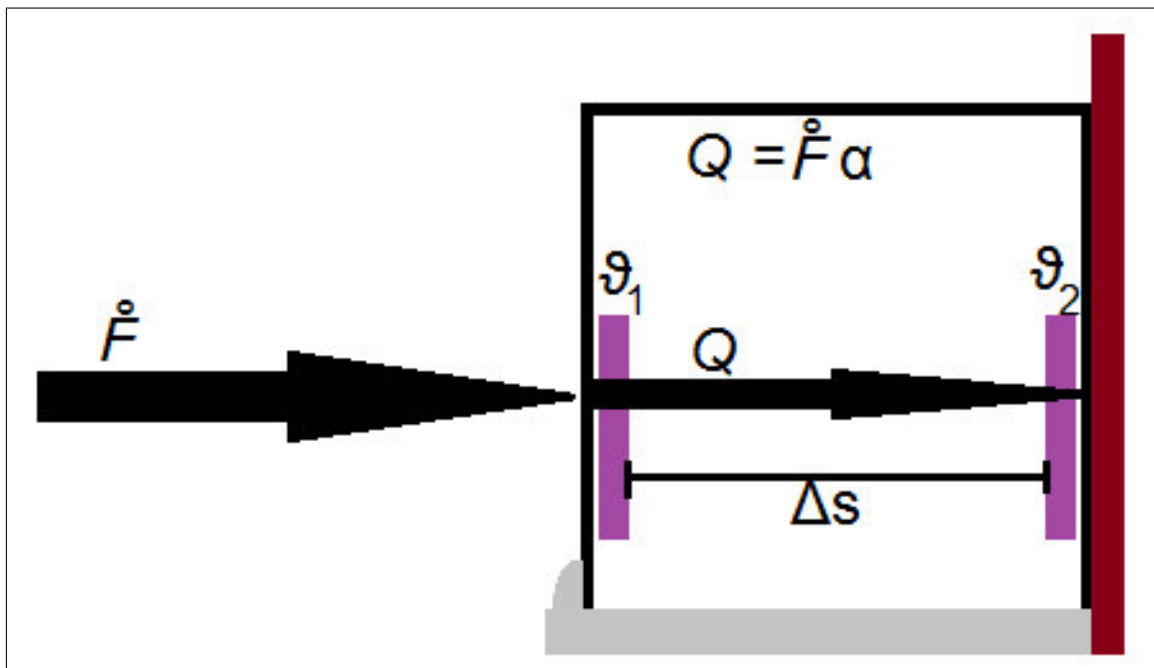


Abbildung 5.2: Schematische Darstellung der zu bestimmenden Variablen für den Wärmeleitkoeffizienten

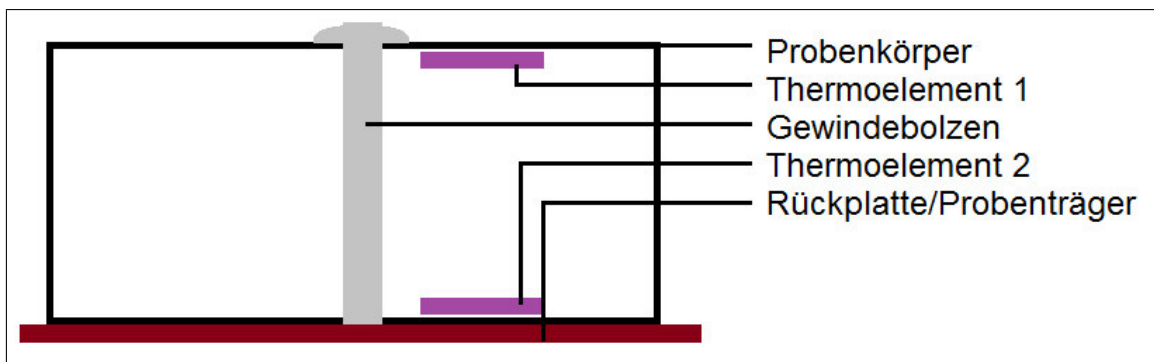


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung der Thermoelementpositionierung zur Bestimmung des Wärmeleitkoeffizienten

5.2.1 Auswertung der Strahlungsflussdichte

Die auf die Probe auftreffende Strahlungsflussdichte \dot{F} hat auf die Bestimmung der Wärmeleitkoeffizienten über die Gleichung 2.7 einen fundamentalen Einfluss. Sie transportiert dauerhaft eine bestimmte Wärmemenge in den Probenkörper, weshalb es zu Temperaturverläufen innerhalb der Probe kommt.

Die mittlere Strahlungsflussdichte

Um nach Gleichung 2.7 aussagekräftige Ergebnisse der Wärmeleitkoeffizienten zu erhalten, muss die Strahlungsflussdichte über einen längeren Zeitraum konstant sein. In den Abbildungen 5.4 und 5.5 ist erkenntlich, dass die ermittelten Strahlungsflussdichten stark schwankten. Aufgrund des unbeständigen Wetters herrschten somit keine optimalen Bedingungen. Zusätzlich wurde ein Messwertumformer verwendet um den Ausgangsstrom des Radiometers in eine für die E.Bloxx-Messkarten messbare Spannung umzuwandeln. Dieser reduzierte jedoch die Auflösung des Messbereichs auf 10 bit. Um dennoch Erkenntnisse aus den Messreihen zu gewinnen, wurden arithmetische Mittelwerte mit zugehörigen Standardabweichungen bestimmt. Die jeweiligen Messbereiche mit annähernd konstanten Strahlungsflussdichten, sind durch I, II und III in Abbildung 5.4 und 5.5 gekennzeichnet. Es ergaben sich für diese Messbereiche folgende Mittelwerte und Standardabweichungen:

Messreihe	Messbereich	$\bar{\dot{F}}$ in $\frac{W}{m^2}$	$\Delta\dot{F}$ in $\frac{W}{m^2}$
1	I	10630	790
2	II	5600	540
2	III	3050	870

Tabelle 5.2: Die mittleren Strahlungsflussdichten der Messreihen eins und zwei mit zugehörigen Standardabweichungen

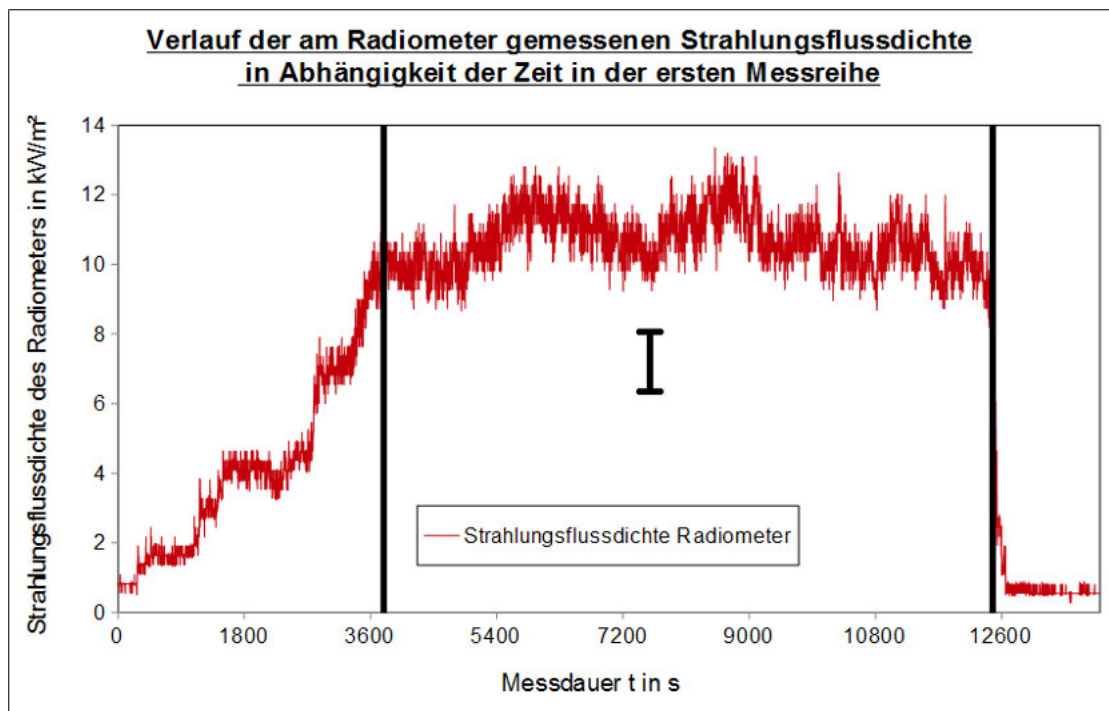


Abbildung 5.4: Verlauf der durch das Radiometer ermittelten Strahlungsflussdichte der ersten Messreihe

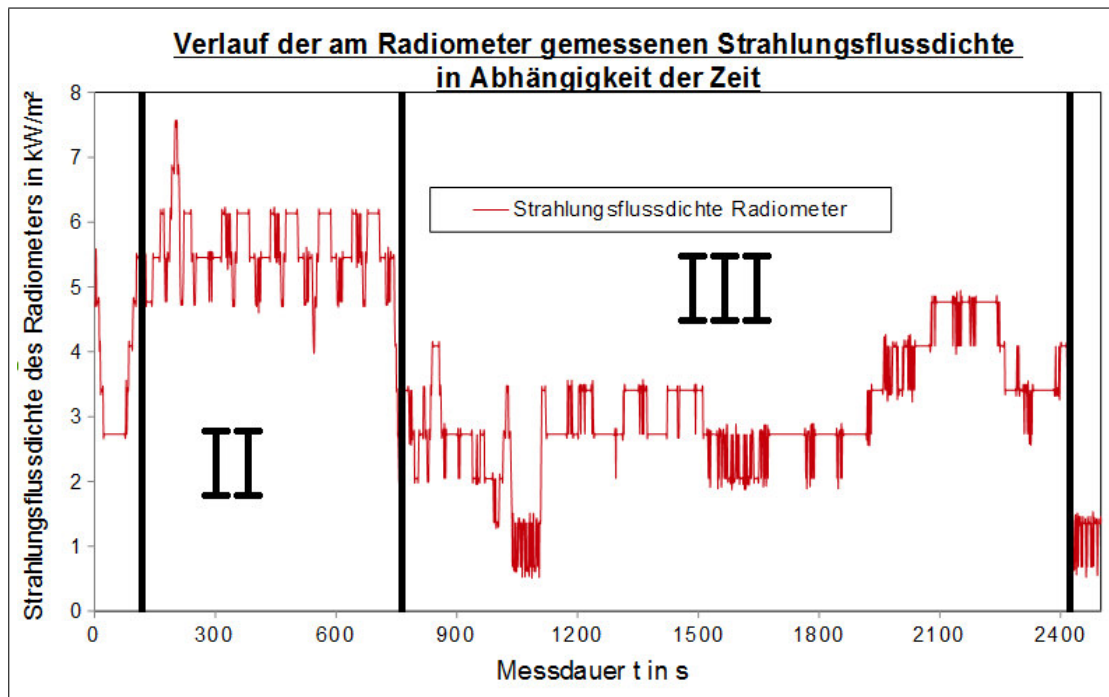


Abbildung 5.5: Verlauf der durch das Radiometer ermittelten Strahlungsflussdichte der zweiten Messreihe

Der Bestrahlungsfokus

Das Radiometer dient am Materialtestfeld als einzige Möglichkeit zur Erfassung der auftreffenden Strahlungsflussdichte. Da es bei größeren bestrahlten Objekten zu einer ungleichmäßigen Strahlungsflussdichteverteilung kommen kann, muss die Homogenität der Bestrahlung ermittelt werden. Um Aussagen über die Homogenität der Strahlungsflussdichte treffen zu können, wurden während der Bestrahlung des Materialtestfeldes Grauwertbilder von einer im Heliostatfeld befindlichen Kamera aufgenommen. Je heller die auf den Grauwertbildern angezeigten Bereiche sind, desto höher war die reflektierte Leistung. In Abbildung 5.6 ist ein Grauwertbild aus der ersten Messreihe dargestellt. Wie in den theoretischen Grundlagen beschrieben, ist das menschliche Auge im farblichen Spektrum sensibler als in der Schwarz-Weiß-Betrachtung. Aus diesem Grund, ist die Helligkeitsverteilung des Grauwertbildes in Graphik 5.7 als Falschfarbendarstellung abgebildet. Wichtig bei der Betrachtung der Abbildungen 5.6 und 5.7 ist, dass nur die Helligkeitsverhältnisse gleicher Materialien Erkenntnisse über die aufgetroffenen Leistungen liefern, denn nur gleiche Materialien besitzen den selben Reflexionskoeffizienten. Das Verhältnis der reflektierten Leistung entspricht dem Leistungsverhältnis, welches auf das Materialtestfeld einfällt. Aus diesem Grund wurden zum Einen Reflexionskörper in der Nähe des Radiometers und zum Anderen in der Nähe der Proben in das Materialtestfeld eingebaut. Mit Hilfe des in der Nähe des Radiometers befindlichen Reflexionskörpers kann über ein Grauwertverhältnis eine korrigierte Strahlungsflussdichte für die Proben berechnet werden. Die korrigierte Strahlungsflussdichte berechnet sich dann aus dem Quotienten zwischen Grauwert des Probenreflexionskörpers zum Grauwert des Radiometer-Reflexionskörpers

multipliziert mit der am Radiometer ermittelten Strahlungsflussdichte. Es folgt:

$$\dot{F}_{kor} = \dot{F}_{Radiometer} \cdot \frac{\kappa_{Kühlkörper}}{\kappa_{Radiometer}} = K_G \cdot \dot{F}_{Radiometer} \quad (5.1)$$

Bei der Betrachtung des Grauwertbildes kam der Einfall, dass das Coating des Strahlenschutzes, ein Verbundmaterial welches die Aluminiumsilikatwolle vor Witterung schützen soll, ebenfalls als Berechnungsgrundlage für die korrigierte Strahlungsflussdichte dienen kann. Die Grundvoraussetzung einer diffusen Reflexion wird dabei vom Coating erfüllt. Bei der Betrachtung der Abbildungen 5.6 und 5.7 ist vor allem bei der Falschfarbendarstellung ersichtlich, dass die reflektierten Leistungen am Coating des Materialtestfeldes um ca. 15 % voneinander abweichen. Aus diesem Grund wurde für jede Probe ein eigener Korrekturfaktor der Strahlungsflussdichte bestimmt. Um zu überprüfen, ob sich das Coating auch als Referenzmaterial eignet, wurden die Korrekturfaktoren einmal über die Reflexionskörper des Materialtestfeldes und andererseits über das Coating ermittelt.

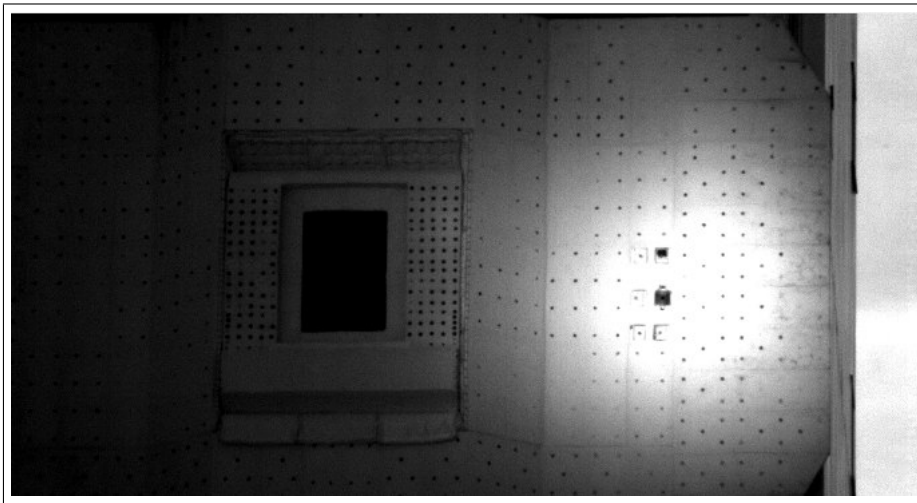


Abbildung 5.6: Grauwertbild des bestrahlten Materialtestfeldes aus der ersten Messreihe

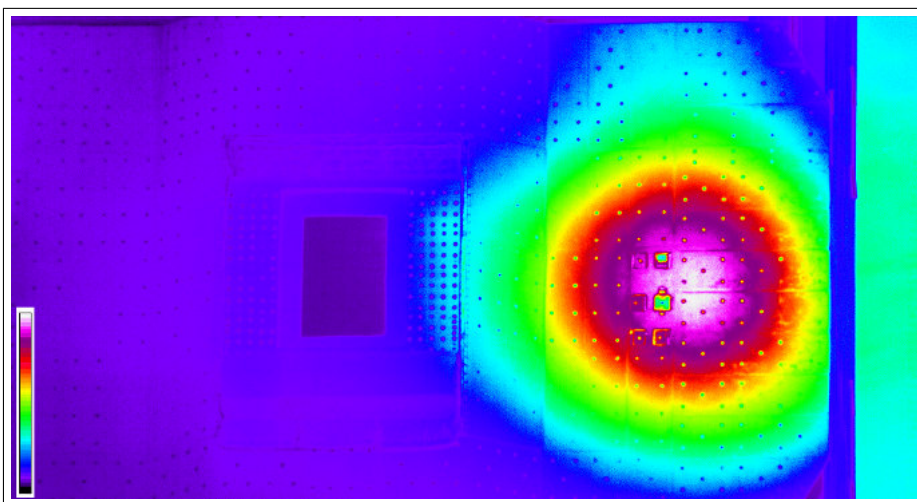


Abbildung 5.7: Falschfarbendarstellung des bestrahlten Materialtestfeldes aus der ersten Messreihe

Bestimmung der Grauwerte

Um die Informationen aus den Abbildungen 5.6 und 5.7 mathematisch verarbeiten zu können, müssen diese in einem Korrekturfaktor zusammengefasst werden. Der zu berechnende Korrekturfaktor K_G resultiert aus dem Quotienten des Grauwertes in der Nähe der Probe zum Grauwert des Referenzpunktes, welcher sich in der Nähe des Radiometers befindet. Die installierten Reflexionskörper und das umliegende Coating des Strahlenschutzes dienten dabei als Messflächen. Die gemessene Strahlungsflussdichte des Radiometers wurde den rot hervorgehobenen Bereichen in der Abbildung 5.8 zugeordnet. Wohingegen die Grauwerte der blauen Bereiche den jeweiligen Proben zugewiesen wurden. Hierbei bezieht sich die linke Abbildung auf die Verwendung des Coatings und die mittlere und rechte auf die Verwendung der Reflexionskörper als Messbereich. Die mittlere Graphik gehört dabei zur ersten Messreihe und die rechte Abbildung zur zweiten Messreihe. Die linke Abbildung ist für beide Messreihen unter Verwendung des Coatings als Messbereich gültig.

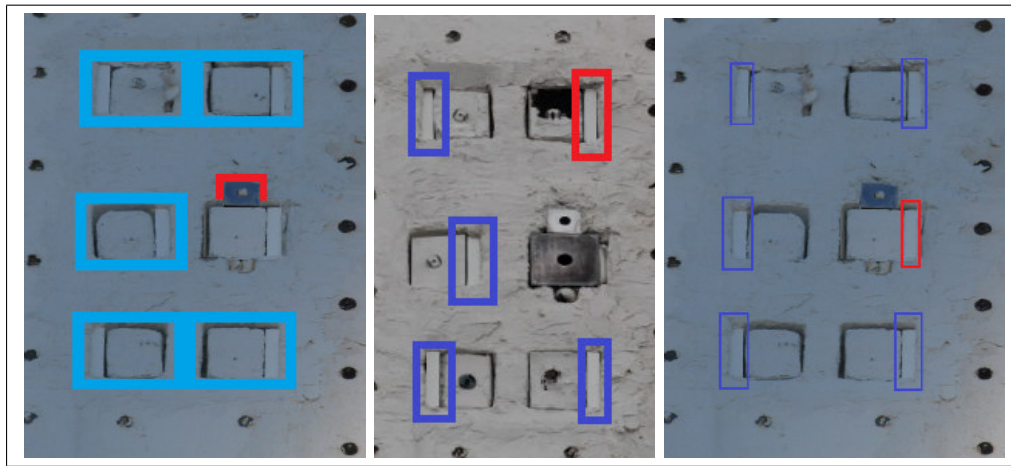


Abbildung 5.8: Verwendete Reflexionsflächen zur Bestimmung der korrigierten Strahlungsflussdichte

Um die Bereiche aus der Abbildung 5.8 mit den Grauwerten der Abbildung 5.6 mathematisch in Verbindung zu bringen, wurde ein zusätzliches LabView Programm geschrieben. Dieses hat die Funktion jedem einzelnen Pixel mit zugehörigem Grauwert eine eigene Zelle in einem Tabellendokument zuzuordnen. Für eine bessere Orientierung im Tabellenkalkulationsprogramm wurden die betroffenen Zellen für beide Messreihen, wie in den Abbildungen 5.10 und 5.9, farbig markiert. In den Abbildungen stehen die roten Zellen für die Reflexionskörper, die Gelben für die Proben, die Grünen für das Radiometer und die Schwarzen für das SunCatch STJ. Bei der Korrektur der Strahlungsflussdichte über das Coating wurden die Grauwerte, wie in Abbildung 5.8 links skizziert, innerhalb eines 1,5 cm großen Rahmen um die jeweilige Probe verwendet. Da die Auflösung der im Heliostatfeld platzierten Kamera ein Pixel pro 5 mm Probengröße beträgt, entspricht die jeweilige Rahmendicke im Tabellenkalkulationsprogramm 3 Zellen.

Abbildung 5.9: Darstellung der Proben, der Reflexionskörper, des SunCatch STJ und des Radiometers im Tabellenkalkulationsprogramm der ersten Messreihe

Abbildung 5.10: Darstellung der Proben, der Reflexionskörper und des Radiometers im Tabellenkalkulationsprogramm der zweiten Messreihe

Ergebnis des Grauwertvergleiches

Mit Hilfe des Tabellekalkulationsprogramms konnten auch die mittleren Grauwerte der farbig markierten Flächen aus Abbildung 5.8 berechnet werden. Die hierbei bestimmten Grauwerte und den nach Gleichung 5.1 berechneten Korrekturfaktoren werden in Tabelle 5.3 festgehalten. Mit Hilfe der Korrekturfaktoren können die aus Tabelle 5.2 bestimmten mittleren Strahlungsflussdichten für die einzelnen Proben nach Gleichung 5.1 umgerechnet werden. Die in der Tabelle 5.3 aufgeführten Grauwerte geben Auskunft über der von den Materialoberflächen reflektierten Lichtmenge bezogen auf die verwendete Belichtungszeit und eingestellten Blendenöffnung der Kamera. Innerhalb eines Fotos können so die unterschiedlichen Pixel-Helligkeiten miteinander verglichen werden. Dabei entsprechen Pixel mit hohen Grauwerten auch größeren Helligkeiten, als es beispielsweise bei niedrigen Grauwerten der Fall wäre. Aufgrund der Berechnung der Korrekturfaktoren nach Gleichung 5.1 muss dem Radiometer zur Bestimmung der auftretenden Strahlungsflussdichte auf die einzelnen Probenpositionen ein Referenzgrauwert zugeordnet werden. Die Referenzbereiche sind in der Abbildung 5.8 rot hervorgehoben. Innerhalb des ersten Messbereiches war die Referenzposition für das Radiometer, aufgrund des eingebauten SunCatch STJ, der Reflexionskörper bei Position zwei. In den Messbereichen zwei und drei wurde die Position vier als Referenz ausgewählt. Betrachtet und vergleicht man die in Tabelle 5.3 aufgeführten Korrekturfaktoren, so fallen zwei Dinge besonders auf. Zum Einen ähneln sich die Korrekturfaktoren der gleichen Position und des gleichen Bereiches mit unterschiedlichem Referenzmaterial stark. Zum Anderen ist zu erkennen, dass im Messbereich I eine sehr homogene und in den Messbereichen II und III eine inhomogene Strahlungsflussdichteverteilung vorliegt. Die Homogenität ist daran zu erkennen, dass die Korrekturfaktoren im ersten Messbereich zueinander nur um maximal 3 % voneinander abweichen. Wohingegen im II. und III. Messbereich die Korrekturfaktoren um bis zu 30 % abweichen, was auf eine Inhomogenität schließen lässt. Da die auftretenden Messgrößenfehler im ersten Messbereich deutlich größer sind als der Einfluss der Korrekturfaktoren wird für die weitere Auswertung des ersten Messbereichs von einer homogenen Strahlungsflussdichteverteilung mit dem Korrekturfaktor von $K_G = 1$ weiter gerechnet. Im Gegensatz dazu muss für den II. und III. Bereich in weiteren Berechnungen eine positionsbezogene Korrektur der Strahlungsflussdichten für die einzelnen Proben durchgeführt werden.

Messbereich	Position	Referenzpunkte	Grauwert	Korrekturfaktor	\dot{F} in $\frac{W}{m^2}$	$\Delta \dot{F}$ in $\frac{W}{m^2}$
I	Radiometer	Coating	950	1,000	10630	790
I	1	Coating	962	1,013	10768	800
I	2	Coating	948	0,998	10608	788
I	3	Coating	966	1,017	10810	803
I	4	Coating	950	1,000	10630	790
I	5	Coating	961	1,012	10758	799
I	6	Coating	949	0,999	10619	789
I	1	Reflexionskörper	963	1,015	10789	802
I	2	Reflexionskörper	949	1,000	10630	790
I	3	Reflexionskörper	969	1,021	10853	807
I	5	Reflexionskörper	963	1,015	10789	802
I	6	Reflexionskörper	948	0,999	10619	789
II	Radiometer	Coating	2800	1,000	5600	540
II	1	Coating	2502	0,894	5006	483
II	2	Coating	2555	0,913	5113	493
II	3	Coating	2463	0,879	4922	475
II	4	Coating	2851	1,018	5701	550
II	5	Coating	2227	0,795	4452	429
II	6	Coating	2285	0,816	4600	441
II	1	Reflexionskörper	2294	0,881	4934	476
II	2	Reflexionskörper	2403	0,923	5169	498
II	3	Reflexionskörper	2305	0,885	4956	478
II	4	Reflexionskörper	2604	1,000	5600	540
II	5	Reflexionskörper	1982	0,761	4262	411
II	6	Reflexionskörper	2185	0,839	4698	453
III	Radiometer	Coating	1728	1,000	3050	870
III	1	Coating	1553	0,899	2742	782
III	2	Coating	1557	0,901	2748	784
III	3	Coating	1562	0,905	2760	787
III	4	Coating	1759	1,018	3105	886
III	5	Coating	1623	0,940	2867	818
III	6	Coating	1590	0,920	2806	800
III	1	Reflexionskörper	1561	0,861	2626	749
III	2	Reflexionskörper	1675	0,923	2815	803
III	3	Reflexionskörper	1614	0,889	2711	773
III	4	Reflexionskörper	1815	1,000	3050	870
III	5	Reflexionskörper	1693	0,933	2846	812
III	6	Reflexionskörper	1690	0,931	2840	810

Tabelle 5.3: Ergebnisse der Korrekturfaktoren für die Strahlungsflussdichte der ersten und zweiten Messreihe

5.2.2 Die Absorptionskoeffizienten

Wie viel Wärme vom jeweiligen Probenkörper aufgenommen wird, hängt vom materialspezifischen Absorptionskoeffizienten ab. Aufgrund der Tatsache, dass für die verwendeten Materialien diese Koeffizienten nicht bekannt waren, wurden für die Aluminiumsilikatwolle, die Erdalkalisilikatwolle und die MACOR-Probe mit einem geschätzten Absorptionskoeffizienten α von 25 % gerechnet. Dieser Wert ergibt sich aus dem Vergleich der Absorptionskoeffizienten verschiedener weißer Keramiken. Aufgrund der Variation dieser Werte wird von einem Fehlerbereich von ± 5 % ausgegangen. Die einzelnen Absorptionskoeffizienten sind in Tabelle 5.4 festgehalten.

Material	α in %	$\Delta\alpha$ in %
Macor	25	5
Aluminiumsilikatwolle	25	5
Erdalkalisilikatwolle	25	5

Tabelle 5.4: Die für die Inbetriebnahme geschätzten Absorptionskoeffizienten der Probenkörper

5.2.3 Abstände der Thermoelemente

Die Anordnung der Thermoelemente, wie in Abbildung 5.3 gezeigt, diente der Ermittlung der Temperaturverläufe sowohl an der Probenoberfläche, als auch innerhalb der Probe. Die Thermoelemente wurden für einen möglichst großen Temperaturunterschied so weit wie möglich voneinander fluchtend positioniert. Die dabei entstandenen Abstände sind in Tabelle 5.5 dokumentiert. Die Fehler der bestimmten Abstände sind Aufgrund von Rundbohrungen, in welche die Thermoelemente geschoben wurden und möglicherweise nicht senkrecht zum Probenrand verlaufen, größer als die Genauigkeit des Messschiebers.

Material	Δs in cm	$\Delta(\Delta s)$ in cm
Macor	3,0	0,2
Aluminiumsilikatwolle	1,5	0,2
Erdalkalisilikatwolle	1,5	0,2

Tabelle 5.5: Die für die Inbetriebnahme erfassten Thermoelementabstände innerhalb eines Probenkörpers

5.2.4 Die erfassten Temperaturverläufe

Exemplarisch sind in den Abbildungen 5.11 und 5.12 die Temperaturverläufe der ersten und zweiten Messreihe dargestellt. In den Diagrammen gehören die schwarze und die graue Kurve zu den Aluminiumfaser-Proben, die Grünen zu der Aluminiumsilikatwolle, die Blauen zu der Erdalkalisilikatwolle, die Orangen zum MACOR und die Rote zur Strahlungsflussdichte des Radiometers. Besaß eine Probe mehrere Thermoelemente sind die Graphen, anhand der Positionierung der Thermoelemente, unterschiedlich dargestellt. Die Oberflächentemperaturen wurden mit einer durchgezogenen Kurve und die Temperaturen im Inneren der Probe mit einer gestrichelten Linie visualisiert. Beide Diagramme lassen eine direkte Proportionalität zwischen der rot eingezeichneten Strahlungsflussdichte und den Temperaturverläufen erkennen. Die Temperaturen im Inneren der Proben reagieren dabei etwas verzögert. Das lässt sich durch die benötigte Zeit für den Wärmetransport zwischen der Probenoberfläche und dem zweiten Thermoelement erklären. Aus der Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche und der Temperatur im Inneren der Probe kann die materialspezifische Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden. Die Berechnung der spezifischen Wärmeleitkoeffizienten erfolgt nach Gleichung 2.7.

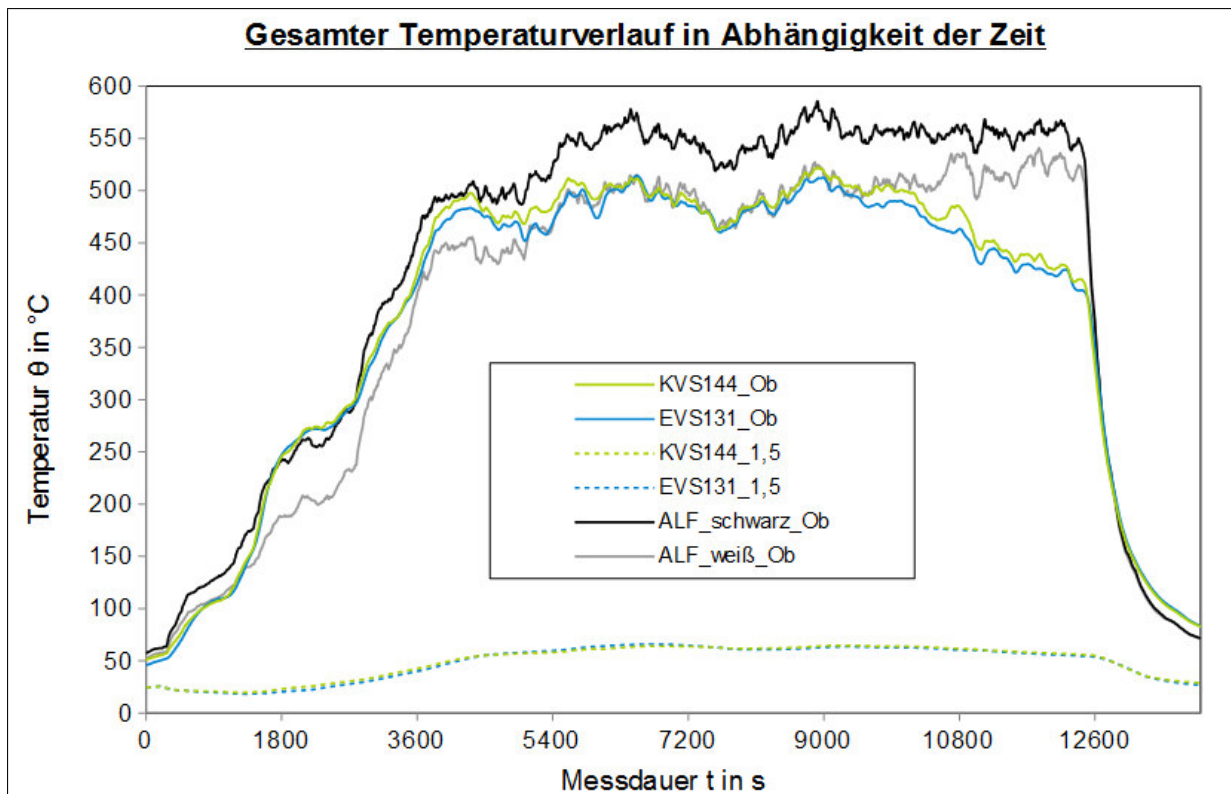


Abbildung 5.11: Darstellung des Temperaturverlaufs in Abhängigkeit der Zeit resultierend aus der ersten Messreihe

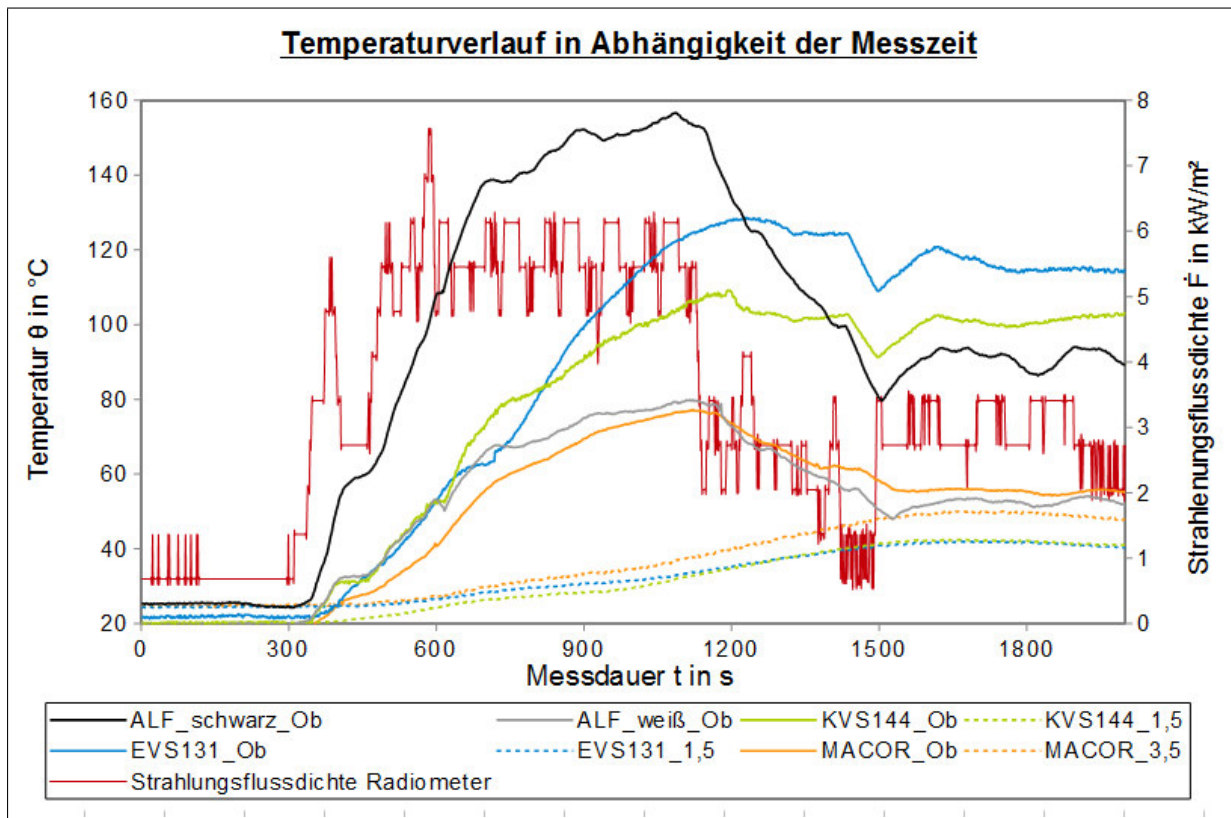


Abbildung 5.12: Darstellung des Temperaturverlaufs in Abhängigkeit der Zeit resultierend aus der zweiten Messreihe

5.2.5 Stagnation der Temperaturverläufe

Als nächster Schritt wurden die fehlenden Temperaturwerte der Gleichung 2.7 zur Bestimmung der Wärmeleitkoeffizienten ermittelt. Hierzu wurde eine Sättigungsfunktion in den Temperaturverlauf des jeweiligen Materials im betrachteten Messintervall gelegt. Exemplarisch ist die graphische Bestimmung der Endtemperaturen von MACOR in den Abbildungen 5.13 und 5.14 dargestellt. Die in der Abbildung 5.12 gezeigten Temperaturverläufe wurden aus der Abbildung 5.12 separiert und sind in orange dargestellt. In jeden Temperaturverlauf wurde eine violette Sättigungsfunktion eingezeichnet. Dieser violette Verlauf sollte zur Orientierung des weiteren Temperaturverlaufs dienen, wenn die Strahlungsflussdichte konstant geblieben wäre. Zudem lässt sich so die Stagnation der Temperaturverläufe abschätzen. Da der abgeschätzte Wert nicht direkt gemessen werden konnte, wurde ein grau dargestellter Fehlerbereich mit berücksichtigt. Analog zu diesen graphischen Auswertungen wurden die Sättigungstemperaturen der Messbereiche I, II und III für die Aluminiumsilikatwolle, die Erdalkalisilikatwolle und die MACOR-Probe aus den Abbildungen 5.11 und 5.12 bestimmt. Dabei resultierten folgende Werte:

Messreihe	Messbereich	Probe	θ_1 in $^{\circ}C$	θ_2 in $^{\circ}C$	$\Delta\theta_1$ in $^{\circ}C$	$\Delta\theta_2$ in $^{\circ}C$
1	I	MACOR	-	-	-	-
		KVS144	490	63	30	5
		EVS131	490	63	30	5
2	II	MACOR	82	52	5	5
		KVS144	125	50	10	5
		EVS131	140	45	10	5
2	III	MACOR	53	45	2	2
		KVS144	102	41	2	2
		EVS131	114	39	2	2

Tabelle 5.6: Ermittelte Temperaturendwerte

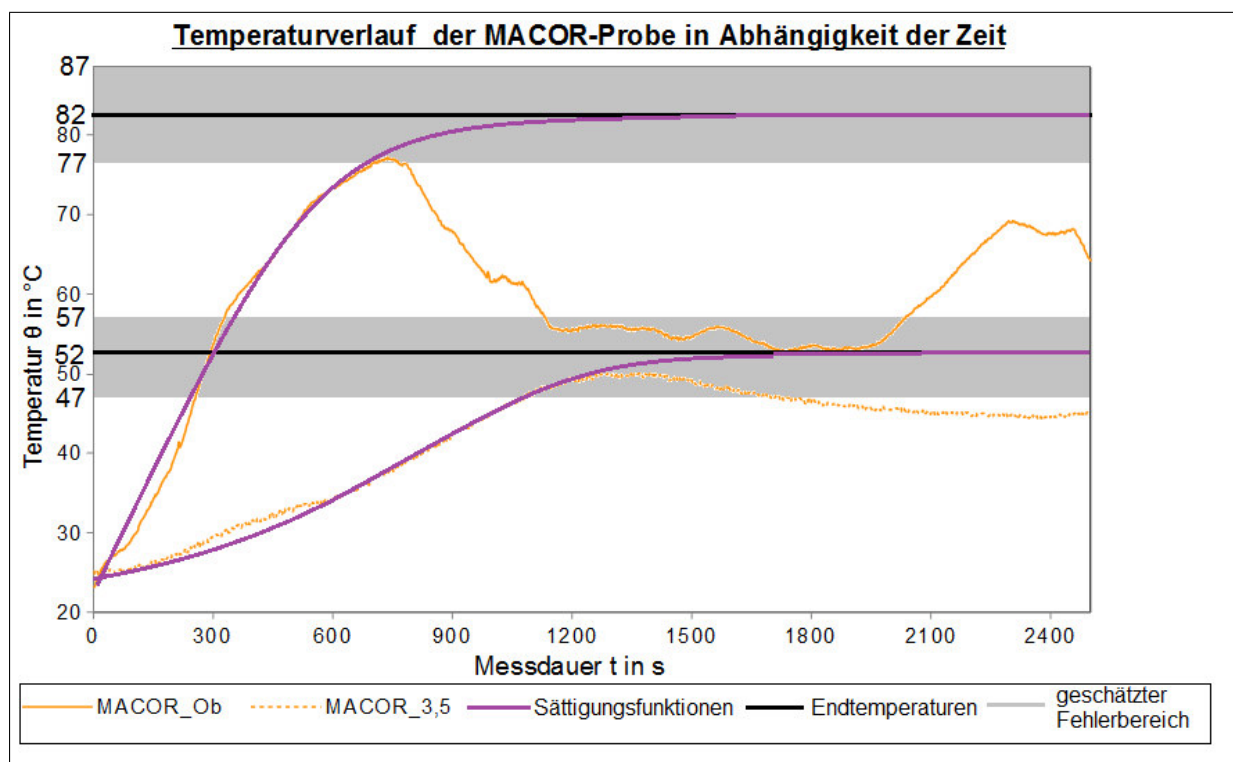


Abbildung 5.13: Exemplarische Bestimmung der Stagnationstemperaturen von MACOR im zweiten Messbereich

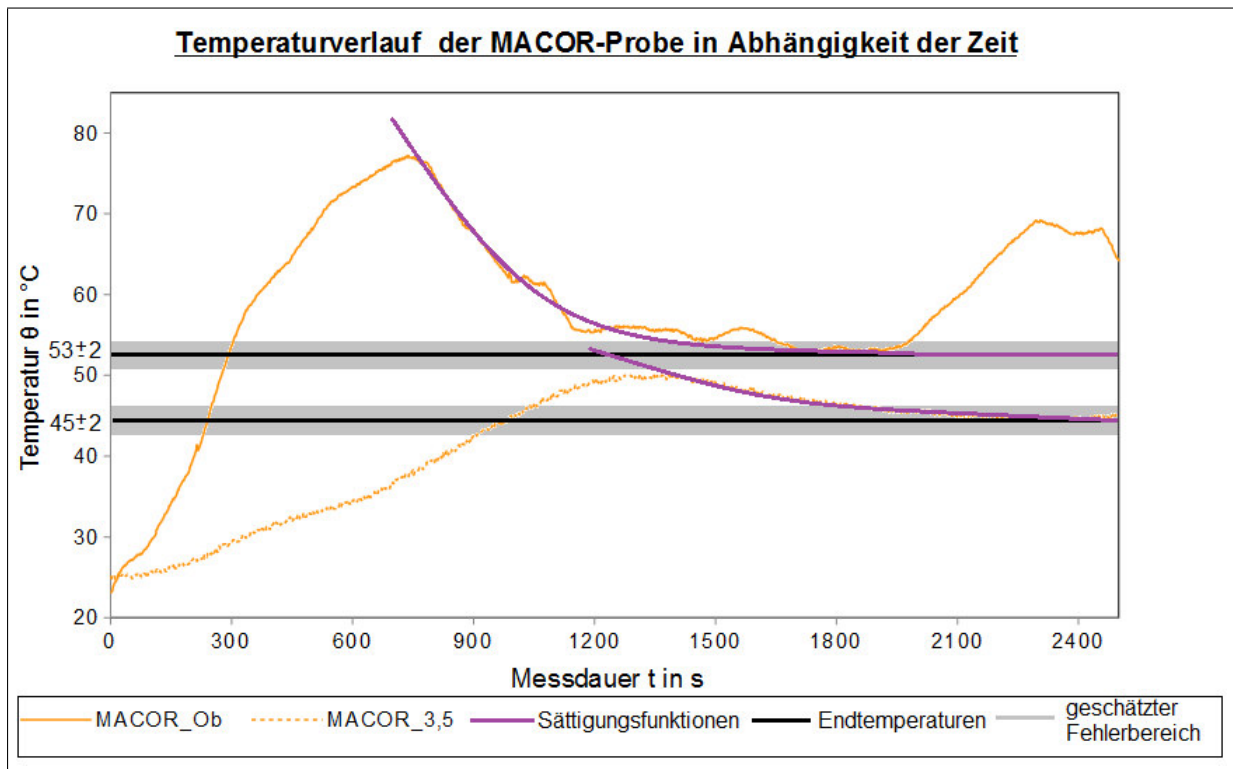


Abbildung 5.14: Exemplarische Bestimmung der Stagnationstemperaturen von MACOR im dritten Messbereich

5.2.6 Berechnung des Wärmeleitkoeffizienten

Mit Hilfe der in den Tabellen 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, und 5.6 festgehaltenen Variablen konnten nach Gleichung 2.7 die Wärmeleitkoeffizienten berechnet werden. Alle berechneten Wärmeleitkoeffizienten finden sich in der Tabelle 5.7 wieder.

Messreihe	Referenz	Probe	λ in $\frac{W}{mK}$
Erste Messreihe	Mittelwert	MACOR	-
		KVS144	0,09
		EVS131	0,09
Zweite Messreihe, zweiter Messbereich	Mittelwert	MACOR	1,40
		KVS144	0,28
		EVS131	0,22
	Coating	MACOR	1,23
		KVS144	0,22
		EVS131	0,18
	Kühlkörper	MACOR	1,24
		KVS144	0,21
		EVS131	0,19
Zweite Messreihe, dritter Messbereich	Mittelwert	MACOR	2,86
		KVS144	0,19
		EVS131	0,15
	Coating	MACOR	2,59
		KVS144	0,18
		EVS131	0,14
	Kühlkörper	MACOR	2,54
		KVS144	0,17
		EVS131	0,14

Tabelle 5.7: Ergebnistabelle der Wärmeleitungskoeffizienten

5.2.7 Fehlerabschätzung der experimentell bestimmten Wärmeleitkoeffizienten

Jede Messung ist mit einem Messfehler behaftet. Um diesen Messfehler für die Bestimmung des Wärmeleitkoeffizienten möglichst genau eingrenzen zu können, wurden für alle Messungen bei der Inbetriebnahme Berechnungen zur Fehlerfortpflanzung durchgeführt. Zugrundeliegend dafür ist die Gleichungen 5.2:

$$\lambda = \frac{\dot{F} \cdot \Delta s \cdot \alpha}{\Delta \theta} \quad (5.2)$$

Für die Abschätzung der Fehlerfortpflanzung wurde der Ansatz einer Taylorreihenentwicklung gewählt, welche jeweils nach dem ersten Glied abgebrochen wurde:

$$\Delta \lambda = \left| \frac{\partial \lambda}{\partial \dot{F}} \right| \cdot \Delta \dot{F} + \left| \frac{\partial \lambda}{\partial \alpha} \right| \cdot \Delta \alpha + \left| \frac{\partial \lambda}{\partial \Delta s} \right| \cdot \Delta(\Delta s) + \left| \frac{\partial \lambda}{\partial \theta_1} \right| \cdot \Delta \theta_1 + \left| \frac{\partial \lambda}{\partial \theta_2} \right| \cdot \Delta \theta_2 \quad (5.3)$$

Nach den einzelnen Ableitungen folgt der resultierende Fehler des Wärmeleitkoeffizienten:

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta s \cdot \alpha}{\theta_1 - \theta_2} \cdot \Delta\dot{F} + \frac{\dot{F} \cdot \Delta s}{\theta_1 - \theta_2} \cdot \Delta\alpha + \frac{\dot{F} \cdot \alpha}{\theta_1 - \theta_2} \cdot \Delta(\Delta s) + \frac{\dot{F} \cdot \Delta s \cdot \alpha}{(\theta_1 - \theta_2)} \cdot (\Delta\theta_1 + \Delta\theta_2) \quad (5.4)$$

Nachfolgend sind alle Ergebnisse zur Bestimmung der Wärmeleitkoeffizienten von Aluminiumsilikatwolle, Erdalkalisilikatwolle und MACOR in Tabelle 5.8 festgehalten:

Messreihe	Referenz	Probe	λ in $\frac{W}{mK}$	$\Delta\lambda$ in $\frac{W}{mK}$
Erste Messreihe	Mittelwert	MACOR	-	-
		KVS144	0,09	0,05
		EVS131	0,09	0,05
Zweite Messreihe, zweiter Messbereich	Mittelwert	MACOR	1,40	0,98
		KVS144	0,28	0,18
		EVS131	0,22	0,13
	Coating	MACOR	1,23	0,86
		KVS144	0,22	0,14
		EVS131	0,18	0,11
	Kühlkörper	MACOR	1,24	0,86
		KVS144	0,21	0,13
		EVS131	0,19	0,11
Zweite Messreihe, dritter Messbereich	Mittelwert	MACOR	2,86	3,01
		KVS144	0,19	0,13
		EVS131	0,15	0,10
	Coating	MACOR	2,59	2,72
		KVS144	0,18	0,12
		EVS131	0,14	0,09
	Kühlkörper	MACOR	2,54	2,67
		KVS144	0,17	0,12
		EVS131	0,14	0,10

Tabelle 5.8: Ergebnistabelle der Wärmeleitungskoeffizienten mit Fehlerangaben

5.3 Optische Untersuchung von Materialien

Damit Proben auf ihr Verhalten gegenüber den hohen Strahlenbelastungen analysiert werden können, bietet das Materialtestfeld die Möglichkeit durch einen schnelle Ausbau der Proben, diese mit Hilfe eines USB-Mikroskops mit 500-facher Vergrößerung zu betrachten. Proben eines Materials können aus diesem Grund mit unterschiedlichen Bestrahlungszeiten, oder Intensitäten untersucht werden. Für Veränderungen der Materialien, welche nicht optisch oder mit der 500-fachen Vergrößerung erfassbar sind, können externe Laboratorien beauftragt werden. Resultierend aus den Erkenntnissen können unter anderem Alternativen für den Strahlenschutz gefunden werden.

5.3.1 Untersuchung von schwarzen und weißen Aluminiumfasern

Zur Inbetriebnahme und einer ersten optischen Untersuchung von Materialien wurden Aluminiumfasern in schwarz und weiß als Proben in das Materialtestfeld eingebaut. Hierbei sollte ein besonderes Augenmerk auf die schwarzen Aluminiumfasern bezüglich ihrer Temperaturentwicklung im Vergleich zu den weißen Aluminiumfasern und der optischen Veränderungen des Materials gelegt werden. Die Probenpräparation sah dabei so aus, dass direkt unterhalb der Aluminiumfasern jeweils ein Thermoelement positioniert war. Die Temperaturverläufe sind in den Abbildungen 5.15 und 5.16 dargestellt. Dabei gehört der graue Graph zu den weißen Aluminiumfasern und der schwarze Graph zu den schwarzen Aluminiumfasern. Stellt man die beiden Temperaturverläufe der weißen und der schwarzen Aluminiumfasern aus der ersten Messreihe wie in Abbildung 5.15 gegenüber, so ist ein deutlicher Temperaturoffset von etwa 50 °C erkennbar. Dieser Offset wird im Verlauf der Messung immer kleiner und die Graphen verlaufen zueinander konvergent. Betrachtet man hingegen die Temperaturverläufe der zweiten Messreihe in Abbildung 5.16, so ist ein Temperaturunterschied von maximal 75 °C zwischen den beiden Stoffen erkennbar. Die Begründung findet sich darin, dass der schwarze Farbstoff während der ersten Messreihe verklumpte und abplatzte. Wohingegen der Farbstoff bei der zweiten Messreihe unverändert blieb. In Abbildung 5.17 ist die ausgebaute Aluminiumfaser-Probe der ersten Messreihe gezeigt. Diese Probe hat sich im bestrahlten Bereich fast vollständig entfärbt. Auf der Probe befindet sich ein kleiner feinkörniger schwarzer Staub. Die Abbildungen 5.18, 5.19 und 5.20 zeigen die unterschiedlichen Bereiche der in Abbildung 5.17 dargestellten Fotografie mit 500-facher Vergrößerung. In Abbildung 5.18 sind die geschwärzten Aluminiumfasern erkennbar. Wohingegen sich in Abbildung 5.19 nur noch weiße Aluminiumfasern befinden. Deutlicher wird der Entfärbungsprozess in Abbildung 5.20. Hier sind stellenweise noch schwarze Fasern erkennbar, jedoch finden sich ebenso abgeplatzte schwarze Farbkörner. Im Gegensatz zu der ersten Messreihe konnten in der zweiten Messreihe keine optischen Veränderungen der schwarzen oder weißen Aluminiumfasern festgestellt werden. Dies grenzt das Abplatzen des schwarzen Farbstoffs in den Temperaturbereich von 160 °C bis 550 °C ein. Weitere Temperaturintervallmessungen könnten Aufschluss über die maximale Temperaturbelastung geben. Es ist aber festzuhalten, dass die geschwärzten Aluminiumfasern nicht für die im Messaufbau erreichte maximale Strahlungsflussdichte und die hierbei erreichte Endtemperatur geeignet sind.

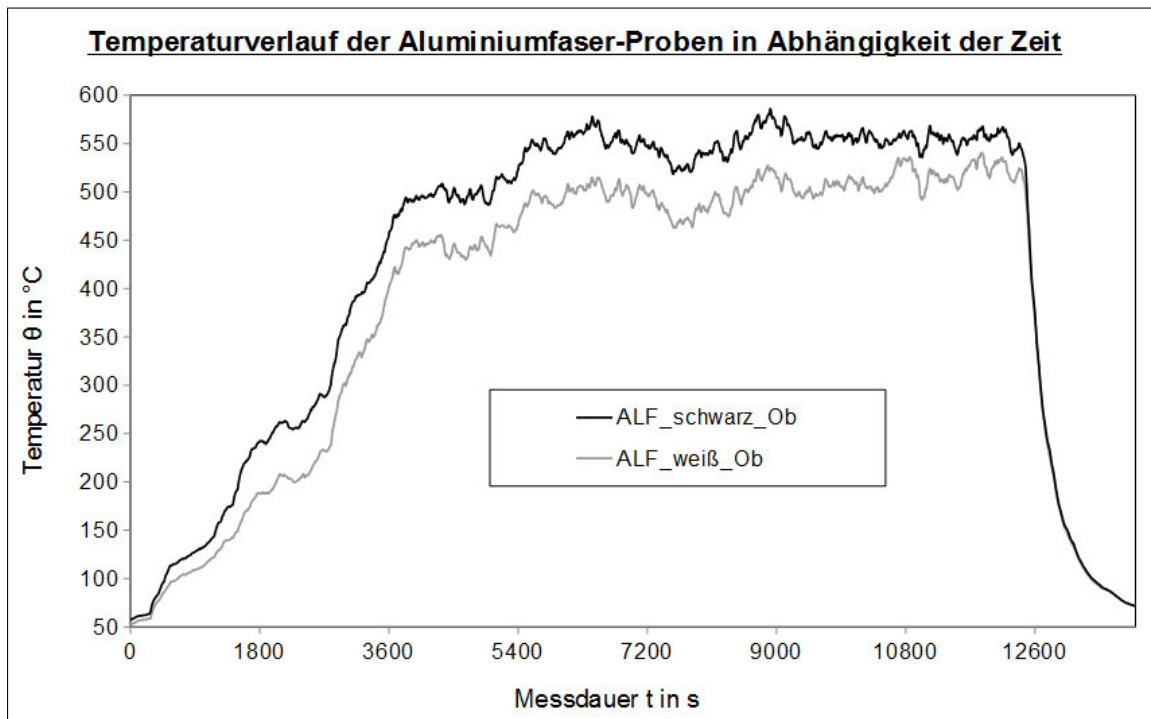


Abbildung 5.15: Darstellung der erfassten Messwerte der Aluminiumfaser-Proben aus der ersten Messreihe

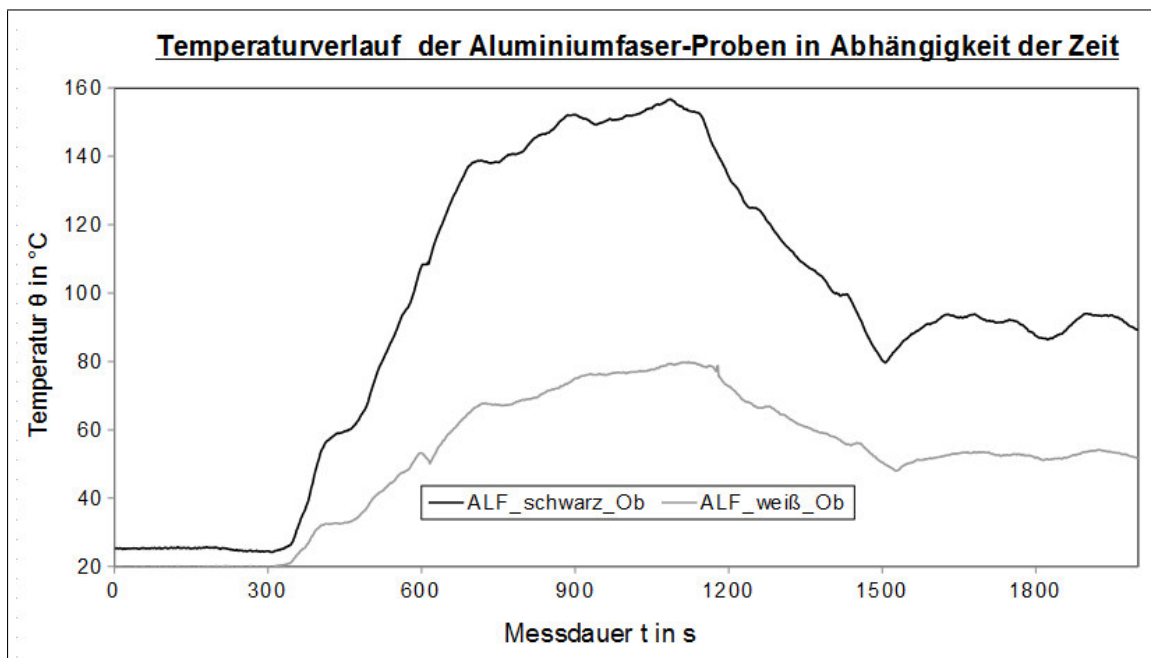


Abbildung 5.16: Darstellung der erfassten Messwerte der Aluminiumfaser-Proben aus der zweiten Messreihe

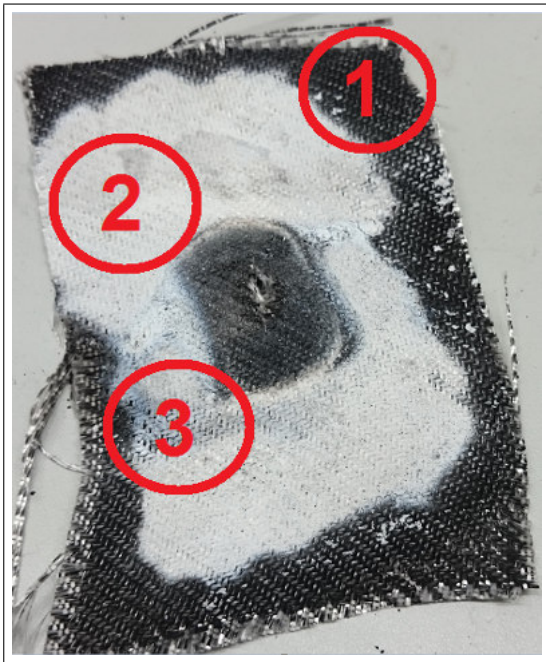


Abbildung 5.17: Fotografie der ausgebauten schwarzen Aluminiumfaser-Probe



Abbildung 5.18: 500-fache Vergrößerung des schwarzen-ALF(1) Bereichs

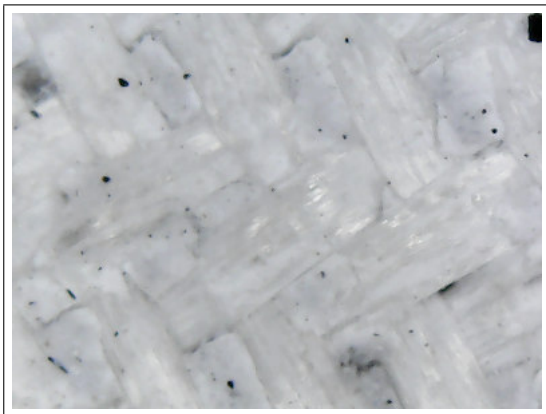


Abbildung 5.19: 500-fache Vergrößerung des weißen-ALF(2) Bereichs

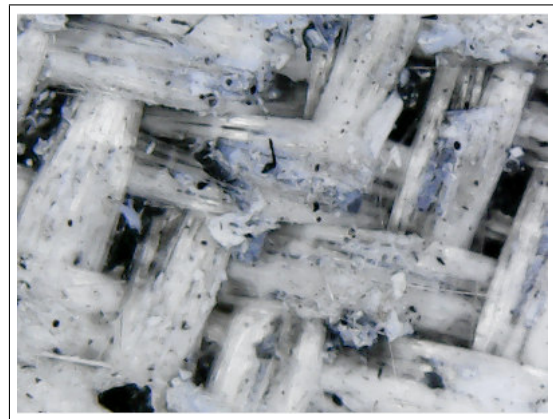


Abbildung 5.20: 500-fache Vergrößerung des grauen-ALF(3) Bereichs

5.4 Bestimmung des linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten

Das thermische Verhalten von Materialien beschränkt sich nicht nur auf optische oder strukturelle Veränderungen, sondern beinhaltet auch die Längen- und Volumenausdehnung. Die Längenausdehnung kann mit Hilfe der Widerstandsänderung eines, an der Probe befestigten, Dehnungsmessstreifens ermittelt werden.

5.4.1 Die Erfassung der Widerstandsänderung

Abbildung 5.21 zeigt schematisch die Widerstandserfassung des Dehnungsmessstreifens vom Materialtestfeld. Der Dehnungsmessstreifen befand sich an der Rückseite der MACOR-Probe in direkter Nähe zum zweiten Thermoelement. Über Vierleiter-Messtechnik und einer Thermoausgleichsleitung werden die Messgrößen zu den jeweiligen E.Bloxx-Messkarten übertragen. Die E.Bloxx-Messkarte verwendet dabei eine interne Voll-Messbrücke und wandelt die analogen Messgrößen in ein digitales Ausgangssignal um und überträgt es über einen RS485-Bus an den PC. Auf dem PC werden die Widerstandsänderungen des Dehnungsmessstreifens über eine LabView-Software erfasst und dokumentiert.

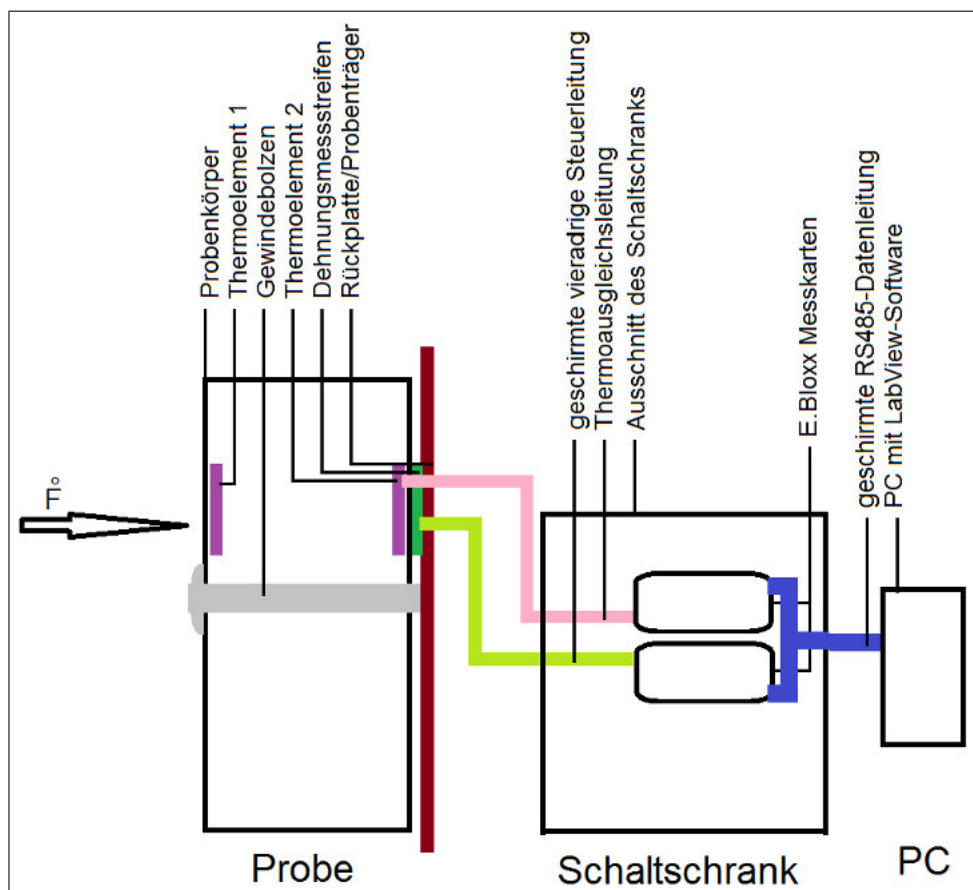


Abbildung 5.21: Schematische Darstellung der Messgrößenerfassung des Dehnungsmessstreifens

5.4.2 Darstellung der erfassten Widerstandsänderungen

Um die Längenausdehnung in der Inbetriebnahme erfassen zu können, wurden in der zweiten Messreihe, neben den Temperaturverläufen, auch die Widerstandsänderungen eines Dehnungsmessstreifens aufgenommen. Die ermittelten relativen Widerstandsänderungen, bezogen auf die Ausgangswerte, sind in Abhängigkeit der Temperaturänderung in Abbildung 5.22 dargestellt. Die blauen Messpunkte sind die ermittelten Widerstandsänderungen bezogen auf die Temperaturänderung zum Beginn der Messung. Durch das lineare Verhalten der Widerstandsänderungen wurden dem Diagramm eine schwarze Regressionsgrade mit der dazugehörigen Funktion und dem Bestimmtheitsmaß hinzugefügt.

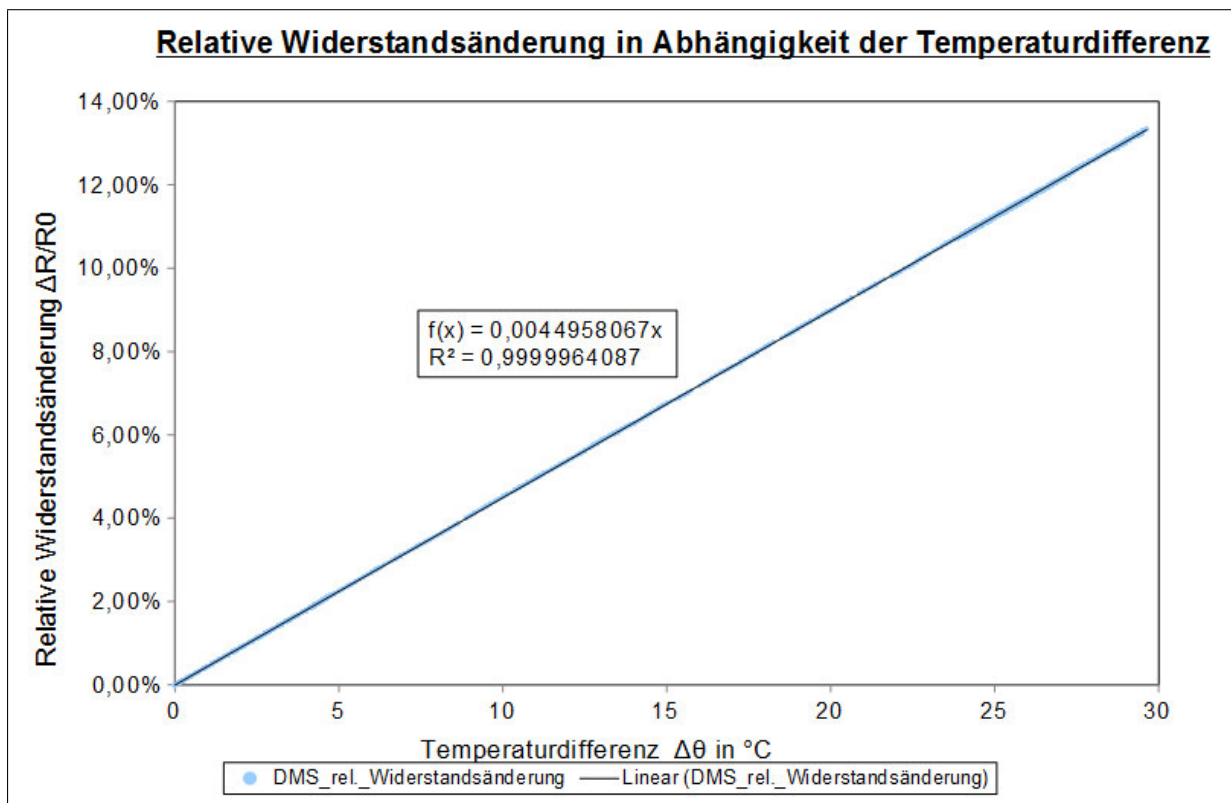


Abbildung 5.22: Die relative Widerstandsänderung in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz

5.4.3 Berechnung des linearen Ausdehnungskoeffizienten

Mit Hilfe der Regressionssteigung m_r lässt sich die Gleichung 2.26 wie folgt reduzieren:

$$\bar{\alpha}_s = \frac{m_r - \beta_{DMS}}{K_{DMS}} + \alpha_{DMS} \quad (5.5)$$

Das Einsetzen der Variablen in Gleichung 5.5 liefert den thermischen Ausdehnungskoeffizienten und dieser beträgt $\bar{\alpha}_s \approx 9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

5.4.4 Fehlerrechnung zur Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten

Zur Fehlerabschätzung wird, wie bei der Fehlerbestimmung des Wärmeleitkoeffizienten, eine Taylorreihenentwicklung durchgeführt. Als Ausgangsfunktion wird die Gleichung 5.5 verwendet. Die Gleichung der Fehlerfortpflanzung lautet dann wie folgt:

$$\Delta\alpha_s = \left| \frac{\partial\alpha_s}{\partial\alpha_{DMS}} \right| \cdot \Delta\alpha_{DMS} + \left| \frac{\partial\alpha_s}{\partial K_{DMS}} \right| \cdot \Delta K_{DMS} + \left| \frac{\partial\alpha_s}{\partial\beta_{DMS}} \right| \cdot \Delta(\beta_{DMS}) + \left| \frac{\partial\alpha_{DMS}}{\partial m_r} \right| \cdot \Delta m_r \quad (5.6)$$

Um die Standardabweichung des Ausdehnungskoeffizienten zu bestimmen, fehlt noch die Standardabweichung der ermittelten Steigung. Diese erhalten wir durch das Einsetzen des Bestimmtheitsmaßes R^2 in folgende Formel:

$$\Delta m_r = \left| \sqrt{m_r \cdot \frac{1}{N-2} \left(\frac{1}{R^2} - 1 \right)} \right| \quad (5.7)$$

Durch Ableiten der Gleichung 5.6 folgt:

$$\Delta\alpha_s = \left| \frac{m_r - \beta_{DMS}}{K_{DMS}} \right| \cdot \Delta\alpha_{DMS} + \left| \frac{m_r - \beta_{DMS}}{K_{DMS}^2} \right| \cdot \Delta K_{DMS} + \left| \frac{1}{K_{DMS}} \right| \cdot \Delta\beta_{DMS} + \left| \frac{1}{K_{DMS}} \right| \cdot \Delta m_r \quad (5.8)$$

Durch das Einsetzen der Variablen aus Tabelle 5.9 folgt der Messfehler der Fehlerfortpflanzung für den linearen Ausdehnungskoeffizienten von MACOR. Das Ergebnis ist in Tabelle 5.9 festgehalten.

Messgröße	Dimension und Einheit	Messwert
N	1	6898
m_r	10^{-3} K^{-1}	4,4958
Δm_r	10^{-10} K^{-1}	9,87
β_{DMS}	10^{-3} K^{-1}	4,45
$\Delta \beta_{DMS}$	10^{-6} K^{-1}	2,25
K_{DMS}	1	2
ΔK_{DMS}	1	0,1
α_{DMS}	10^{-5} K^{-1}	1,08
$\Delta \alpha_{DMS}$	10^{-7} K^{-1}	5
α_s	10^{-6} K^{-1}	9
$\Delta \alpha_s$	10^{-6} K^{-1}	1,02

Tabelle 5.9: Variablen und Ergebnisse zur Bestimmung des linearen Ausdehnungskoeffizienten von MACOR

Zum Einen muss bei der Anschaffung von Dehnungsmessstreifen darauf geachtet werden, dass es sich dabei um Verbrauchsmaterial handelt. Das bedeutet, dass dieser nach der Entfernung von der Probe entsorgt werden muss. Zum Anderen muss das Gittermaterial und die Gitterform so gewählt werden, dass der zu untersuchende Messbereich mit einer optimalen Empfindlichkeit abgedeckt ist. Für die Inbetriebnahme wurde ein Dehnungsmessstreifen verwendet, welcher einerseits kostengünstig in der Anschaffung war und andererseits einen möglichst großen Messbereich abdeckte. Der große Messbereich des Dehnungsmessstreifens führte zu einer geringen Empfindlichkeit im eingesetzten Bereich. Hierbei findet sich die Möglichkeit den Messfehler im weiteren Betrieb des Materialtestfeldes zu reduzieren. Dieser kann durch die Verwendung anderer Gittermaterialien und Formen, welche eine größere Empfindlichkeit für den zu untersuchenden Messbereich besitzen, verkleinert werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Bei der Betrachtung der Ergebnisse für die gemittelte und korrigierte Strahlungsflussdichte zeigte sich, dass die Berechnung eines Korrekturfaktors einen großen Einfluss auf die Messergebnisse hatte. Die Abweichungen der Strahlungsflussdichten lag stellenweise bei $\pm 30\%$. Da die Bestimmung des Grauwertkoeffizienten über das Coating vertikale und horizontale Daten erfasst, sollte in der weiteren Verwendung des Materialtestfeldes auf diese Näherung zurückgegriffen werden.

Die Bestimmungen der Wärmeleitkoeffizienten von Aluminiumsilikatwolle, Erdalkalisilikatwolle und MACOR sind untereinander vergleichbar und liegen in den richtigen Größenordnungen. Im Eignungstest der schwarzen Aluminiumfasern zeigte sich, dass der Farbstoff innerhalb eines Temperaturbereichs von 160°C bis 550°C abplatzt. Daraus ist schlussfolgernd zu sagen, dass die schwarzen Aluminiumfasern nicht für den am Solarturm Jülich montierten Strahlenschutz geeignet sind. Für eine möglichst gute Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten muss zum Einen eine konstant bleibende Strahlungsflussdichte auf die Proben treffen und zum Anderen eine möglichst stationäre Temperaturverteilung in den Proben erreicht werden. Des Weiteren sollte die Anzahl der Heliostaten so gewählt werden, dass eine große Temperaturdifferenz zwischen den beiden Temperaturmesspunkten entsteht. Für die Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen hat sich gezeigt, dass die Widerstandsmessung sehr gut über die Temperatur linear korreliert. Jedoch kam es auch hier zu einem großen Messfehler, welcher durch einen präziseren Dehnungsmessstreifen reduziert werden könnte.

Abschließend ist zu sagen, dass das Materialtestfeld plausible Ergebnisse liefert und für weitere Realitätsversuche verwendet werden kann. Eine Materialcharakterisierung im Labor kann dadurch jedoch nicht ersetzt werden.

6.2 Ausblick

Das gesamte Potential des Materialtestfeldes konnte aus zeitlichen Gründen nicht vollständig innerhalb dieser Bachelorarbeit erfasst werden. Das Materialtestfeld kann für weitere Tests von Dämm- bzw. Isolationsmaterialien verwendet werden, aber auch Aspekte wie das Langzeitverhalten von Proben gegenüber den auftretenden Witterungsbedingungen und den großen thermischen Belastungen können untersucht werden. Zudem besteht die Möglichkeit durch die Aufnahme eines speziellen Leuchtdichtebildes die Blendwirkung einzelner Proben zu untersuchen. Ein weiteres interessantes Messverfahren wäre die Erfassung des beschleunigten Alterungsprozesses der Proben aufgrund der auftretenden UVA- und Wärmestrahlung. Abschließend besteht die Möglichkeit mit Hilfe der Infrarotkamera im Heliostatfeld Oberflächentemperaturen von Materialien zu messen. Hierzu benötigt man jedoch den materialspezifischen Emissionsgrad. Um diesen zu erhalten, könnten Temperaturmessreihen mit einem direkt unter der Oberfläche befindlichen Thermoelement und den dazu gehörigen Wellenlängenmessung der Infrarotkamera ins Verhältnis gesetzt werden. Der daraus resultierende Koeffizient wäre der Emissionsgrad.

7 Anhang

Messwerttabelle für die Bestimmung der Wärmeleitkoeffizienten

Messreihe	Referenz	Probe	θ_1 in °C	θ_2 in °C	$\Delta\theta_1$ in °C	$\Delta\theta_2$ in °C	\dot{F} $\frac{W}{m^2}$ in	$\Delta\dot{F}$ $\frac{W}{m^2}$ in	Δs in m	$\Delta(\Delta s)$ in m	α %	$\Delta\alpha$ in %	K_G	\dot{F}_{Rm} $\frac{W}{m^2}$ in
Erste Messreihe	Mittelwert	MACOR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		KVS144	490	63	30	5	10630	790	0,015	0,002	25	5	1	10630
		EVS131	490	63	30	5	10630	790	0,015	0,002	25	5	1	10630
Zweite Messreihe, erster Messbereich	Mittelwert	MACOR	82	52	5	5	5600	540	0,03	0,002	25	5	1	5600
		KVS144	125	50	10	5	5600	540	0,015	0,002	25	5	1	5600
		EVS131	140	45	10	5	5600	540	0,015	0,002	25	5	1	5600
	Coating	MACOR	82	52	5	5	4922	475	0,03	0,002	25	5	0,879	5600
		KVS144	125	50	10	5	4452	429	0,015	0,002	25	5	0,795	5600
		EVS131	140	45	10	5	4570	441	0,015	0,002	25	5	0,816	5600
Zweite Messreihe, zweiter Messbereich	Kühlkörper	MACOR	82	52	5	5	4956	478	0,03	0,002	25	5	0,889	5600
		KVS144	125	50	10	5	4262	411	0,015	0,002	25	5	0,761	5600
		EVS131	140	45	10	5	5698	453	0,015	0,002	25	5	0,839	5600
	Mittelwert	MACOR	53	45	2	2	3050	870	0,03	0,002	25	5	1	3050
		KVS144	102	41	2	2	3050	870	0,015	0,002	25	5	1	3050
		EVS131	114	39	2	2	3050	870	0,015	0,002	25	5	1	3050
	Coating	MACOR	53	45	2	2	2760	787	0,03	0,002	25	5	0,905	3050
		KVS144	102	41	2	2	2867	818	0,015	0,002	25	5	0,940	3050
		EVS131	114	39	2	2	2806	800	0,015	0,002	25	5	0,920	3050
	Kühlkörper	MACOR	53	45	2	2	2711	773	0,03	0,002	25	5	0,933	3050
		KVS144	102	41	2	2	2846	812	0,015	0,002	25	5	0,931	3050
		EVS131	114	39	2	2	2840	810	0,015	0,002	25	5	0,889	3050

Tabelle 7.1: Zusammenfassung aller für die Bestimmung des Wärmeleitkoeffizienten relevanten Messgrößen

7.1 Datenblätter

Vakuumgeformte Produkte / Vacuum formed products**Evac EVS 131**

Allgemeine Informationen / general information:

- Für die Herstellung dieser Produkte werden nur Rohstoffe der Einstufung K 0 herangezogen. Die Evac-Serie kann als Ersatz für KVS-Produkte dienen, wobei jedoch die Unterschiede im Einsatzverhalten zu prüfen sind. /
These products are manufactured only by means of non-classified (K 0) raw materials. The Evac series can be used as a replacement for the KVS-products. The differences in application properties must be checked.
- Anwendung z.B. als Wärmedämmung für Haushaltsgeräte und Heizkessel /
Applications e.g. as thermal insulation for household appliances and home heating



Rohstoffbasis / Basic raw material:	Erdalkalisilikatwolle / Alkaline-earth silicate wool	
Klassifikationstemperatur / Classification Temperature:	1300°C	
Maximale Anwendung / Maximum application:	1280°C	
Rohdichte / Bulk density (DIN EN 1094-4):	300 kg/m³	
Organische Bestandteile / Organic components:	5 %	
Chemische Analyse / Chemical analyses (EN 955-2; 4):	Al ₂ O ₃	3 %
	SiO ₂	79 %
	CaO/MgO	18 %
Längenänderung / Linear change (DIN EN 1094-6):	24h/1000°C	-1,8 %
	24h/1100°C	-2,2 %
	24h/1300°C	-3,9 %
Wärmeleitfähigkeit nach dem Heizdrahtverfahren / Thermal conductivity according to hot wire method (DIN EN 993-14):	200°C	0,07 W/mK
	400°C	0,09 W/mK
	600°C	0,13 W/mK
	800°C	0,19 W/mK
	1000°C	0,27 W/mK
	1200°C	0,40 W/mK
Druckfestigkeit bei 10 % Kompression / Cold crushing strength at 10 % compression (EN ISO 8895):	--- MPa	
Biegefestigkeit / Cold bending strength (DIN EN 993-6):	--- MPa	

Die angegebenen Daten repräsentieren Durchschnittswerte aus der laufenden Produktion. Sie haben Informationscharakter und sind nicht als Garantiewerte anzusehen.
The given data are mean values of our current production. They are for information only and not to be taken as a guarantee.



top technology
creates confidence

[APPLICATIONS](#)
[PRODUCTS](#)
[CAPABILITIES](#)
[INDUSTRIES](#)
[NEWS](#)
[ABOUT](#)
[CONTACT](#)
[Anfr](#)

PRODUCTS

ALL PRODUCT DATA
SHEET DOWNLOADS



WWW.RATH-GROUP.COM



ALTRA® KVS HIGH-TEMPERATURE

ALTRA® KVS HIGH-TEMPERATURE VACUUM-FORMED BOARDS AND SHAPES

ALTRA® KVS high-temperature vacuum-formed products are available in formulations for service temperatures up to 1800°C. ALTRA® KVS boards and shapes feature low thermal conductivity, excellent thermal shock resistance, high-purity, good machinability, and good density uniformity. ALTRA® KVS is formed from alumina and/or alumino-silicate fibers with appropriate inorganic and organic binders. ALTRA® KVS products are available unfired or pre-fired, resulting in an organic-free composition.

All ALTRA® grades are available in boards, tubes, and other vacuum-formed shapes.

STANDARD BOARD SIZE: 24" x 36", Thickness 1", 1 ½" and 2"
Other board sizes and thickness available upon request.



ALTRA® KVS HIGH-TEMPERATURE VACUUM-FORMED BOARDS AND SHAPES									
Properties	Units	KVS 121	KVS 124	KVS 141	KVS 144	KVS 161	KVS 164	KVS 174/400	KVS 184/400
Classification Temperature	°F	2300	2300	2600	2600	3000	3000	3092	3272
	°C	1260	1260	1430	1430	1650	1650	1700	1800
Service Temperature	°F	2012	2012	2372	2372	2732	2732	3092	3272
	°C	1100	1100	1300	1300	1500	1500	1700	1800
Density	lbs/ft³ (kg/m³)	18 (300)	18 (300)	18 (300)	18 (300)	18 (300)	18 (300)	25 (400)	25 (400)
Organic Content	WT%	4	0	4	0	4	0	0	0
Linear Shrinkage 24 hrs @ Temperature "+" indicates growth	%	3% @ 1100°C	3% @ 1100°C	3.7% @ 1250°C	2% @ 1250°C	2% @ 1250°C	1% @ 1500°C 2% at 1600°C	+0.2 @ 1600°C 0.3% @ 1700°C	0.1% @ 1700°C 0.8% @ 1800°C
Chemical Composition Al ₂ O ₃ SiO ₂	%	50 49	50 49	55 44	55 44	65 34	65 34	81 19	80 20
Thermal Conductivity 752°F(400°C) 1112°F(600°C) 1472°F(800°C) 1832°F(1000°C) 2192°F(1200°C) 2552°F(1400°C)	BTUin/ hrft² °F (W/mK)	0.62 (0.09) 0.83 (0.12) 1.04 (0.15) 1.32 (0.19) 1.73 (0.25) 2.36 (0.34)	0.62 (0.09) 0.83 (0.12) 1.04 (0.15) 1.32 (0.19) 1.73 (0.25) 2.36 (0.34)	0.62 (0.09) 0.83 (0.12) 1.04 (0.15) 1.32 (0.19) 1.66 (0.24) 2.15 (0.31)	0.62 (0.09) 0.83 (0.12) 1.04 (0.15) 1.32 (0.19) 1.66 (0.24) 2.15 (0.31)	1.18 (0.17) 1.25 (0.18) 1.39 (0.20) 1.80 (0.26) 2.36 (0.34) 3.05 (0.44)	1.18 (0.17) 1.25 (0.18) 1.39 (0.20) 1.80 (0.26) 2.36 (0.34) 3.05 (0.44)	0.97 (0.14) 1.18 (0.17) 1.39 (0.20) 1.66 (0.24) 1.94 (0.28) 2.43 (0.35)	0.97 (0.14) 1.18 (0.17) 1.39 (0.20) 1.73 (0.25) 2.01 (0.29) 2.29 (0.33)

DOWNLOADS:

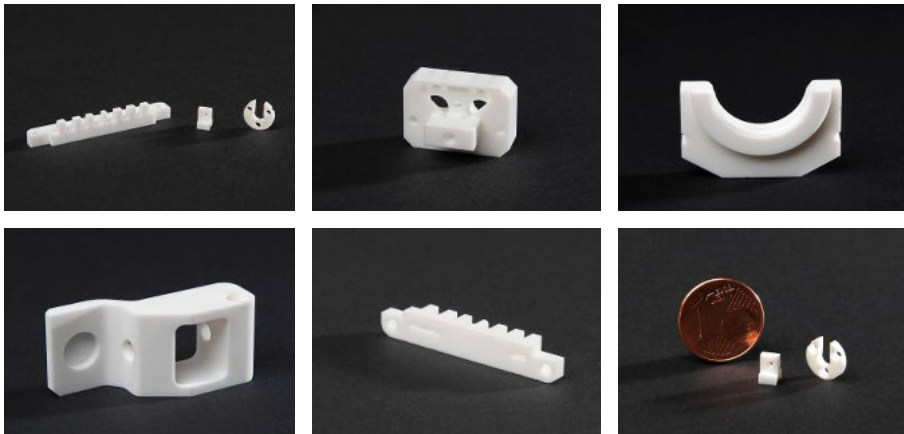
[ALTRA® KVS High-Temperature Vacuum-Formed Boards and Shapes Product Data Sheet](#)

Macor Keramikzerspanung

Macor-Glaskeramik ist ein hervorragendes technisches Material, das mit konventionellen Werkzeugen auf herkömmlichen Dreh- und Fräsmaschinen bearbeitet werden kann.

Durch unsere langjährige Erfahrung in der Keramikbearbeitung sind wir in der Lage auch nach höchsten Ansprüchen Bauteile zeichnungsgerecht zu fertigen.

Exponate der Keramikzerspanung (Auswahl aus bisherigen Arbeiten)



auf Bild klicken, um eine Großansicht zu erhalten...

Da die Form und Präzision der Bauteile lediglich durch die zur Verfügung stehenden Geräte begrenzt wird, bietet Macor eine sehr hohe konstruktive Flexibilität (auch Gewindeschneiden ist möglich).

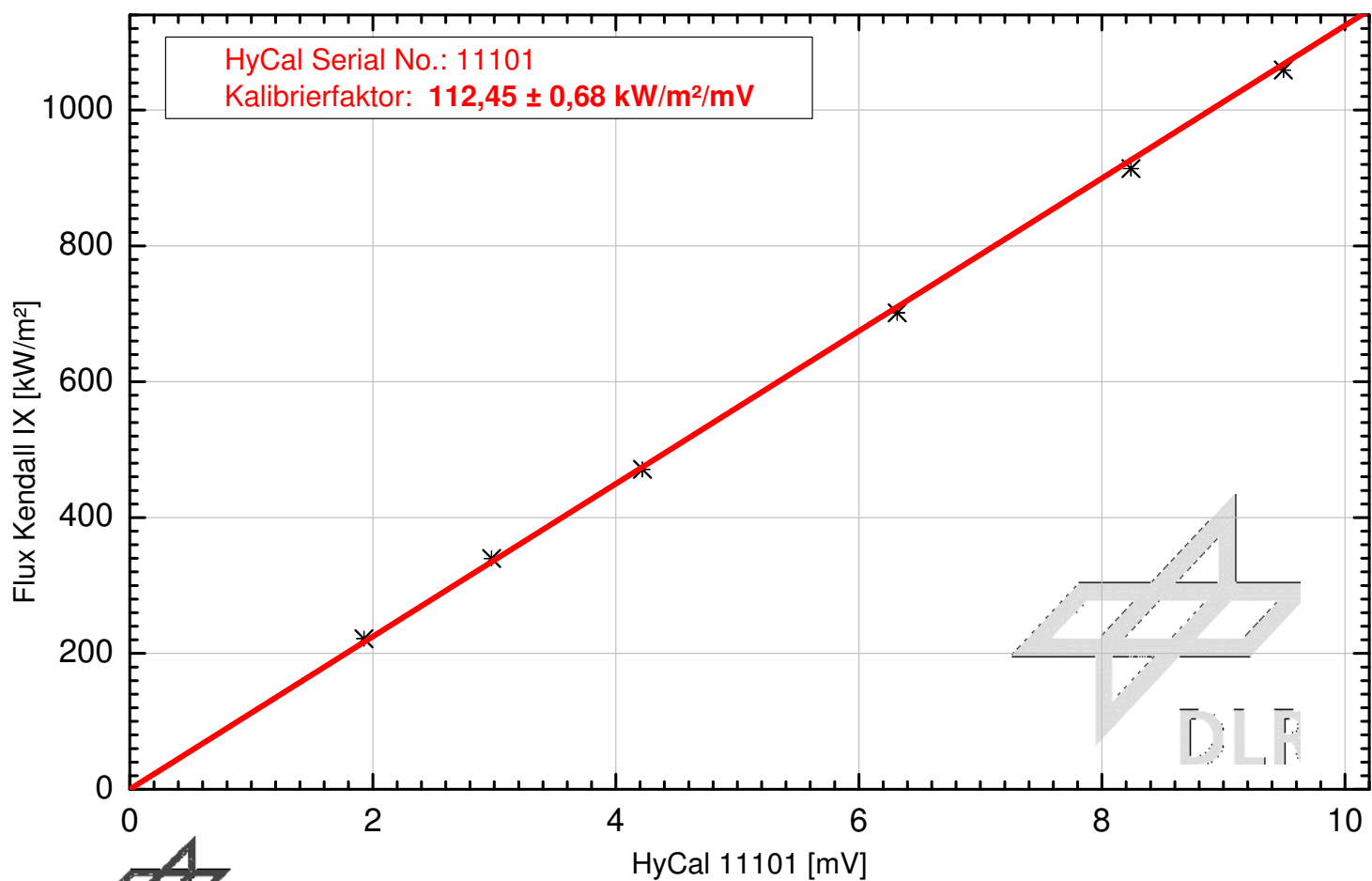
Durch die schnelle Verfügbarkeit der Komponenten erhält man, besonders auch im Prototypenbau, einen Kosten- und Zeitvorteil.

Macor-Bauteile sind auch in kleinen Stückzahlen wirtschaftlich herstellbar.

Spezifikation	Dichte	2,52g /cm ³
mech. Eigenschaften	Porösität:	0%
	Elastizitätsmodul (25°C):	66,9Gpa
	Schubmodul (25°C):	25,5 Gpa
	Knoop Härte (100g):	250
	Bruchmodul (25°C):	94Mpa
	Druckfestigkeit:	345 Mpa
elektrische Eigenschaften:	Dielektrizitätskonstante (25°C):	6,03 (1 KHz)
	Verlustfaktor (25°C):	4,7 x 10 ⁻³ (1 KHz)
	Durchschlagfestigkeit (25°C):	62,4 KV / mm
		(bei 0,254mm Dicke)
	Spez.Durchgangswiderstand:	>1016 OHM/cm
thermische Eigenschaften:	Dauerbetriebstemperatur:	800°C
	Max.lastfreie Temperatur:	1.000°C
	Temperaturleitzahl (25°C):	7,3 x 10 ⁻⁷ m ² /s
	Wärmeleitfähigkeit (25°C):	1,46 W/m°C
	Therm.Ausdehnungskoeffizient (-200 - 25°C):	74 x10 ⁻⁷ /°C
	Therm.Ausdehnungskoeffizient (25 - 300°C):	93x10 ⁻⁷ /°C

Gerne liefern wir Ihnen das technische Datenblatt.

Anwendungen der **Keramikzerspanung** finden sich in der Luft- und Raumfahrttechnik, in der Ultrahochvakuumtechnik, in der Lasertechnik, als Hochtemperaturanwendung, in der Medizintechnik und in der Elektronik- und Halbleitertechnik.



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt
German Aerospace Center

Date: 23-JUN-2016
Type: Hycal 11101

Customer: STJ

II Abbildungsverzeichnis

1.1	Prinzipieller Aufbau des Solarturms Jülich	10
2.1	Schematische Darstellung der Reflexion an einem Planspiegel [6, Ryb2010S.187] . . .	14
2.2	Schematische Darstellung der Reflexion an rauen Oberflächen [6, Ryb2010S.188] . .	15
2.3	Veranschaulichung des Funktionsprinzip eines Thermoelementes	16
2.4	Schematische Schnittdarstellung eines Gardon-Radiometers	17
2.5	Seitliche Schnittdarstellung des SunCatch STJ	18
2.6	Schaltkreis einer einfachen Wheatstone-Messbrücke	21
3.1	Darstellung des geplanten Montagebereichs des Materialtestfeldes	23
3.2	Überblick der erfassbaren Messgrößen und ihre Bestimmung	24
3.3	Frontalansicht des Probenhalters	27
3.4	Rückansicht des Probenhalters	27
3.5	Skizze der nicht bestückten, aber bearbeiteten Strahlenschutzplatte	28
3.6	Skizze der bestückten und bearbeiteten Strahlenschutzplatte	28
3.7	Schematische Darstellung der Baugruppen und der Verbindungen	29
4.1	Flussdiagramm und Kommunikationswege des gesamten Messsystems	30
4.2	Abbildung des montierten und bestückten Materialtestfeldes von innen	31
4.3	Abbildung des montierten und abgedichteten Materialtestfeldes von außen	32
4.4	Abbildung des geschlossenen Schaltschranks	33
4.5	Abbildung des geöffneten Schaltschranks	33
4.6	Graphische Oberfläche des LabView-Programms für den „SunCatch-Betrieb“	34
4.7	Graphische Oberfläche des LabView-Programms für den „Materialtestfeld-Betrieb“ .	35
5.1	Schematische Darstellung der Probenbelegung mit der Betrachtung aus dem Strahlenschutzbereich	37
5.2	Schematische Darstellung der zu bestimmenden Variablen für den Wärmeleitkoeffizienten	38
5.3	Schematische Darstellung der Thermoelementpositionierung zur Bestimmung des Wärmeleitkoeffizienten	38
5.4	Verlauf der durch das Radiometer ermittelten Strahlungsflussdichte der ersten Messreihe	39
5.5	Verlauf der durch das Radiometer ermittelten Strahlungsflussdichte der zweiten Messreihe	40
5.6	Grauwertbild des bestrahlten Materialtestfeldes aus der ersten Messreihe	41
5.7	Falschfarbendarstellung des bestrahlten Materialtestfeldes aus der ersten Messreihe .	41
5.8	Verwendete Reflexionsflächen zur Bestimmung der korrigierten Strahlungsflussdichte	42
5.9	Darstellung der Proben, der Reflexionskörper, des SunCatch STJ und des Radiometers im Tabellenkalkulationsprogramm der ersten Messreihe	43
5.10	Darstellung der Proben, der Reflexionskörper und des Radiometers im Tabellenkalkulationsprogramm der zweiten Messreihe	43

5.11 Darstellung des Temperaturverlaufs in Abhängigkeit der Zeit resultierend aus der ersten Messreihe	47
5.12 Darstellung des Temperaturverlaufs in Abhängigkeit der Zeit resultierend aus der zweiten Messreihe	48
5.13 Exemplarische Bestimmung der Stagnationstemperaturen von MACOR im zweiten Messbereich	49
5.14 Exemplarische Bestimmung der Stagnationstemperaturen von MACOR im dritten Messbereich	50
5.15 Darstellung der erfassten Messwerte der Aluminiumfaser-Proben aus der ersten Messreihe	54
5.16 Darstellung der erfassten Messwerte der Aluminiumfaser-Proben aus der zweiten Messreihe	54
5.17 Fotografie der ausgebauten schwarzen Aluminiumfaser-Probe	55
5.18 500-fache Vergrößerung des schwarzen-ALF(1) Bereichs	55
5.19 500-fache Vergrößerung des weißen-ALF(2) Bereichs	55
5.20 500-fache Vergrößerung des grauen-ALF(3) Bereichs	55
5.21 Schematische Darstellung der Messgrößenerfassung des Dehnungsmessstreifens . . .	56
5.22 Die relative Widerstandsänderung in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz	57

III Tabellenverzeichnis

5.1	Tabellarische Probenbelegung	36
5.2	Die mittleren Strahlungsflussdichten der Messreihen eins und zwei mit zugehörigen Standardabweichungen	39
5.3	Ergebnisse der Korrekturfaktoren für die Strahlungsflussdichte der ersten und zweiten Messreihe	45
5.4	Die für die Inbetriebnahme geschätzten Absorptionskoeffizienten der Probekörper . .	46
5.5	Die für die Inbetriebnahme erfassten Thermoelementabstände innerhalb eines Probekörpers	46
5.6	Ermittelte Temperaturendwerte	49
5.7	Ergebnistabelle der Wärmeleitungskoeffizienten	51
5.8	Ergebnistabelle der Wärmeleitungskoeffizienten mit Fehlerangaben	52
5.9	Variablen und Ergebnisse zur Bestimmung des linearen Ausdehnungskoeffizienten von MACOR	59
7.1	Zusammenfassung aller für die Bestimmung des Wärmeleitkoeffizienten relevanten Messgrößen	62

IV Formelverzeichnis

2.1	Die thermische Längenausdehnung	13
2.2	Der Längenausdehnungskoeffizient	13
2.3	Der Volumenausdehnungskoeffizient	13
2.4	Abhängigkeit der Temperatur-und Wärmeleitfähigkeit	13
2.5	Allgemeine Wärmeleitungsgleichung	13
2.6	Eindimensionale Wärmeleitungsgleichung	13
2.7	Der Wärmeleitkoeffizient	14
2.8	Das Reflexionsgesetz	14
2.9	Der physiologische Blendungsindex	15
2.10	Kontaktspannung eines Thermoelementes	16
2.11	Zweite Kontaktspannung eines Thermoelementes	16
2.12	Gleichsetzung der Thermospannungen	17
2.13	Verlauf der Thermospannungen	17
2.14	Wärmestromermittlung des SunCatch STJ	18
2.15	Widerstandsverhalten von Metallen	19
2.16	Widerstandsverhalten eines Pt100	19
2.17	Widerstand eines elektrischen Leiters	19
2.18	Ansatz zur Bestimmung des relativen Fehlers	19
2.19	Relativer Fehler der Widerstandsänderung	19
2.20	Rel. Widerstandsänderung zur rel. Längenänderung	20
2.21	Der K-Faktor	20
2.22	Die Poisson'sche Zahl	20
2.23	K-Faktor in Abhängigkeit der Poisson'schen Zahl	20
2.24	Die temperaturabhängige DMS-Widerstandsänderung	20
2.25	Spezielle temperaturabhängige DMS-Widerstandsänderung	20
2.26	DMS-Messung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten	20
2.27	Spannungsdifferenz einer Wheatstone-Brücke	21
2.28	Widerstandsverhältnis bei abgeglicherer Messbrücke	21
2.29	Der arithmetische Mittelwert	22
2.30	Die Standardabweichung	22
5.1	Der Grauwertkorrekturfaktor	41
5.2	Gleichung für die Wärmeleitfähigkeit	51
5.3	Ansatz für den Fehler der Wärmeleitfähigkeit	51
5.4	Abschätzung des Fehlers für die Wärmeleitfähigkeit	52
5.5	Vereinfachter thermischer Ausdehnungskoeffizient	58
5.6	Ansatz für den Fehler des Ausdehnungskoeffizienten	58
5.8	Fehlerfortpflanzung für den Ausdehnungskoeffizienten	58

V Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
A	Fläche	m^2
a	Lineare spezifische Materialkonstante	K^{-1}
b	Quadratische spezifische Materialkonstante	K^{-2}
c_p	Spezifische Wärmekapazität	$\frac{\text{J}}{\text{K}}$
D	Querkontraktion	
d	Dicke	
e	Elementarladung	C
\dot{F}	Strahlungsflussdichte	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
G	Blendungsindex	
K	K-Faktor DMS	
K_G	Grauwertkorrekturfaktor	
k	Boltzmann-Konstante	$\frac{\text{J}}{\text{K}}$
k_{AB}	Zusammenschluss der Materialkonstanten	
k_t	Querdehnungsempfindlichkeit	
L_S	Leuchtdichte Blendquelle	$\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$
L_u	Umfeldleuchtdichte	$\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$
l	Länge	
\dot{m}	Massenstrom	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
m_r	Steigung der relativen Widerstandsänderung	K^{-1}
N	Anzahl aufgenommener Messwerte	
n	Situationsbedingter Exponent	
\dot{Q}	Wärmestrom	W
\dot{q}	Wärmestromdichte	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
R	Ohm'scher Widerstand	Ω
R^2	Bestimmtheitsmaß	
s	Strecke	m
T	Temperatur	K
T_0	Anfangstemperatur	K
t	Zeit	s
U	Elektrische Spannung	V
V	Volumen	m^3
W	Leistung	W
\bar{x}	Mittelwert	

Symbol	Beschreibung	Einheit
α	Absorptionskoeffizient	
α_{DMS}	Ausdehnungskoeffizient des DMS-Gittermaterials	K^{-1}
α_s	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	K^{-1}
α_T	Temperaturleitfähigkeit	$\frac{m^2}{s}$
β_{DMS}	Widerstandstemperaturkoeffizient des DMS	K^{-1}
β_s	Volumenausdehnungskoeffizient	K^{-1}
γ	Einfallswinkel	$rad, ^\circ$
γ'	Ausfallswinkel	$rad, ^\circ$
η	Elektronenzahldichte	m^{-3}
θ	Temperatur	$^\circ C$
κ	Grauwert	
λ	Wärmeleitkoeffizient	$\frac{W}{m \cdot K}$
μ	Poisson'sche Zahl	
ρ	Spezifische Dichte	$\frac{kg}{m^3}$
ρ_{el}	Spezifischer elektrischer Widerstand	$\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$
$\bar{\sigma}$	Stefan-Boltzmann-Konstante	$\frac{W}{m^2 K^4}$
σ_x	Standardabweichung	rad, sr
Ω_S	Raumwinkel	
ω	Positionsindex	

VI Literaturverzeichnis

- [1] *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt(2014/2015): Forschungsbilanz und wirtschaftliche Entwicklung 2014/2015.* Köln, 2015
- [2] *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt(2013/2014): Forschungsbilanz und wirtschaftliche Entwicklung 2013/2014.* DLR Köln, 2014
- [3] TIPLER, Paul A. (Hrsg.) ; MOSCA, Gene (Hrsg.) ; WAGNER, Jenny (Hrsg.) ; KOMMER, Christoph (Hrsg.): *Physik: Für Wissenschaftler und Ingenieure.* 7. Aufl. Berlin : Springer Spektrum, 2015. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-54166-7>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-54166-7>. – ISBN 9783642541650
- [4] PETER VON BÖCKH, THOMAS WETZEL: *Wärmeübertragung: Grundlagen und Praxis: 4.Auflage.* Springer Spektrum, 2011. – ISBN 978-3-642-15958-9
- [5] WOLFGANG POLIFKE: *Wärmeübertragung: Grundlagen, analytische und numerische Methoden: 2., aktualisierte Auflage.* München : Pearson Studium ein Imprint der Pearson Education Deutschland GmbH, 2009. – ISBN 978-3-8273-7349-6
- [6] RYBACH, Johannes: *Physik für Bachelors: Mit 92 durchgerechneten Beispielen, 176 Testfragen mit Antworten sowie 93 Übungsaufgaben mit kommentierten Musterlösungen.* 2. aktualisierte Aufl. München : Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl., 2010 <http://www.hanser-elibrary.com/isbn/9783446421691>. – ISBN 9783446421691
- [7] IFA INSTITUT FÜR ARBEITSSCHUTZ DER DEUTSCHEN GESETZLICHEN UNFALLVERSICHERUNG (Hrsg.): *Blendung- Theoretischer Hintergrund: Information des Instituts für Arbeitsschutz der DGUV.* Mai 2010
- [8] CHRISTOPH SCHIERZ ; TU ILMENAU (Hrsg.): *Über die Blendungsbewertung von reflektiertem Sonnenlicht bei Solaranlagen.* Ilmenau, 2012
- [9] SCHRÜFER, Elmar ; REINDL, Leonhard M.: *Elektrische Messtechnik: Messung elektrischer und nichtelektrischer Größen ; mit 41 Tabellen.* 8., neu bearb. Aufl. München : Hanser, 2004 (Studienbücher der technischen Wissenschaften). – ISBN 9783446220706
- [10] JOHANNES LIEHMANN: *Weiterentwicklung einer Strahlungsflussdichtemessung auf der Receiveroberfläche eines Solarturmkraftwerks.* 04.2015
- [11] THOMAS KILOTAITES: *Entwicklung eines Kalibriersystems mit Kalorimetrischem Messprinzip für solare Strahlungsflussdichtemessungen: Bachelorthesis.* Karlsruhe : Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft, 2015
- [12] MICRO-MEASUREMENTS: *Dehnungsmessstreifen und Geräte: Thermisches Ausgangssignal aus DMS und K-Faktor-Änderung mit der Temperatur: Tech Note TN-504-1.* (12.Mai 2010), S. 1–2
- [13] MICRO-MEASUREMENTS: *Dehnungsmessstreifen und Geräte: Messfehler aufgrund der Querdehnungsempfindlichkeit von DMS: Tech Note TN-509.* (05.Mai 2010), S. 2–3

- [14] SALMANG, Hermann ; SCHOLZE, Horst ; TELLE, Rainer: *Keramik (German Edition)*.
Dordrecht : Springer, 2007 <http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=323883>. –
ISBN 3-540-63273-5